

Trabajo Fin de Grado

Julio 2019

ESCUELA
POLITÉCNICA
SUPERIOR DE
ÁVILA

TEMPERATURA SUPERFICIAL TERRESTRE A PARTIR
DE IMÁGENES SATELITALES: HERRAMIENTA PARA SU
CÁLCULO

Ingeniería Geomática y Topografía

Autora: Paula de Andrés Anaya

Tutora: Susana Lagüela López

A la profesora Susana Lagüela por sus ánimos y su
confianza en mí, a Rocio Mora por su ayuda
incondicional y por todas sus enseñanzas, y en
especial a María Sánchez por su infinita paciencia y
su altruismo.

A ellas, mi mayor reconocimiento y gratitud.

Resumen

La importancia de la temperatura superficial terrestre está muy presente en diferentes campos de actuación, tales como en agricultura por su relación con el estado del cultivo [1], en la evaluación de fenómenos naturales como erupciones volcánicas o áreas de potencial geotérmico [2], en estudios de desertificación, o la estimación de diversas variables de interés ambiental como la evapotranspiración [3], entre muchas otras.

La estimación de la temperatura del suelo se puede llevar a cabo de manera puntual mediante termómetros, termistores o pirgeómetros [4] colocados en las zonas de estudio con el inconveniente de que la zona de trabajo sería mínima o de que, si se quisieran cubrir extensas áreas geográficas, esto conllevaría un alto coste económico, ya que debido a la heterogeneidad de las superficies terrestres por su vegetación, áreas urbanas, cultivos, topografía... con propiedades físicas diferentes, sería necesario un gran número de sensores para ser capaces de medir la rápida variación de temperatura en el espacio y en el tiempo. Frente a esta metodología de medición directa, existen otras opciones para el cálculo de la temperatura superficial que permiten obtener su valor de manera continua: las imágenes satelitales.

El cálculo de la temperatura superficial a partir de imágenes satelitales es posible gracias al desarrollo de la tecnología infrarroja térmica y su implementación en los satélites artificiales. Actualmente, existen distintos programas espaciales de observación de la tierra gratuitos, como Copernicus (de la Unión Europea, ESA) o Landsat (por parte de EEUU, NASA) que ofrecen una gran variedad de imágenes con distintas resoluciones, tanto espaciales como temporales. En concreto, en este trabajo de fin de grado se emplearán imágenes del satélite Landsat 8, que incorpora los sensores OLI y TIRS, cuyas imágenes en combinación con las de otros satélites (como Terra o Aqua, para la obtención del vapor de agua) permiten obtener la temperatura del terreno.

Para realizar el cálculo de la temperatura superficial del terreno mediante imágenes de satélite existe una gran variedad de metodologías como por ejemplo el método monocanal (single-window) y los métodos de ventana dividida (split-window) [5]. Es por ello, que la presente propuesta fin de grado busca evaluar las distintas metodologías existentes para posteriormente desarrollar una herramienta con la que poder visualizar y ejecutar cada uno de los métodos creando un método propio y adaptable que sea idóneo para cada caso de estudio.

Índice

| | |
|---|----|
| Resumen..... | 5 |
| Índice de Figuras..... | 10 |
| Índice de tablas..... | 15 |
| 1. Introducción..... | 17 |
| 2. Objetivos..... | 21 |
| 3. Fundamentos básicos de la teledetección: Imágenes de Satélite..... | 23 |
| 3.1. ¿Qué es la teledetección?..... | 23 |
| 3.2. Principios físicos y componentes..... | 24 |
| 3.3. Espectro electromagnético..... | 25 |
| 3.4. Resoluciones de un sensor..... | 25 |
| 3.5. Agencias espaciales..... | 28 |
| 3.6. Correcciones..... | 32 |
| 4. Cálculo de la temperatura superficial terrestre mediante imágenes de satélite..... | 35 |
| 4.1. Imágenes de satélite necesarias..... | 35 |
| 4.2. Correcciones..... | 40 |
| 4.2.1. Corrección geométrica..... | 41 |
| 4.2.2. Corrección del espectro óptico..... | 44 |
| Corrección radiométrica: Radiancia TOA..... | 44 |
| Corrección radiométrica: Reflectancia TOA..... | 45 |
| Corrección atmosférica: reflectancia de la superficie (Moran 1992)..... | 46 |
| 4.2.3. Corrección del espectro térmico..... | 48 |
| Corrección radiométrica: radiancia TOA y reflectancia TOA..... | 49 |
| Corrección radiométrica: temperatura de brillo en el satélite (T _b)..... | 49 |
| Corrección de emisividad..... | 50 |
| Corrección atmosférica: temperatura superficial terrestre..... | 54 |
| 4.3. Corrección atmosférica en el espectro térmico: métodos existentes..... | 54 |
| 4.3.1. Métodos Monocanal..... | 59 |

| | |
|---|-----|
| Monocanal 1 | 62 |
| Monocanal 2 | 63 |
| 4.3.2. Métodos Split-Window | 65 |
| Split-Window 1. | 65 |
| Split-Window 2 | 67 |
| 4.3.3. Método simplificado | 68 |
| 5. Evaluación de métodos y comparativas | 71 |
| 5.1. MATLAB: lenguaje de programación para la automatización de cálculos..... | 71 |
| 5.2. Imágenes ARD: Landsat Analysis Ready Data | 72 |
| 5.3. Métodos de cálculo: evaluación y comparativa..... | 76 |
| 5.4. Método mejorado | 86 |
| 5.4.1. Evaluación numérica | 87 |
| 5.4.2. Evaluación visual | 89 |
| 6. TEMISAT: Temperature from satellite image..... | 97 |
| 6.1. Código de programación | 98 |
| 6.2. Interfaz gráfica..... | 98 |
| 6.2.1. Ayuda del programa | 105 |
| 7. Conclusiones y perspectivas futuras | 109 |
| 7.1. Conclusiones..... | 109 |
| 7.2. Perspectivas futuras..... | 110 |
| Referencias..... | 113 |
| ANEXO I. Propiedad intelectual TEMISAT | 117 |
| ANEXO II. Manual del usuario..... | 118 |
| ANEXO III. Código fuente..... | 139 |
| Temisat.m..... | 140 |
| TemperaturaBrillo.m..... | 173 |
| reflectancia.m | 173 |
| radiancia.m | 174 |

| | |
|----------------------|-----|
| Pvf.m..... | 174 |
| PSImonoTotal.m | 174 |
| PSImono2.m | 175 |
| PSImono1.m | 176 |
| NDVIf.m..... | 176 |
| metadatos.m..... | 177 |
| LSTsplit2.m..... | 181 |
| LSTsplit1.m..... | 183 |
| LSTsimpl.m | 184 |
| LSTmono.m..... | 184 |
| GammaDelta.m..... | 184 |
| emisividad11.m | 185 |
| emisividad10.m | 185 |
| eincrsplit.m..... | 185 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Diferencia de temperatura global de los años 1886/1890 y los años 2012/2016. (Fuente: Animación NASA)..... | 17 |
| Figura 2. Representación de la diferencia del hielo del Ártico de 1985 y 2016. (Fuente: NASA)..... | 17 |
| Figura 3. Imagen del río Guadiana en época de sequía. (Fuente: Google imágenes)..... | 18 |
| Figura 4. Cultivo de soja afectado por la sequía. (Fuente: Google imágenes)..... | 19 |
| Figura 5. Satélite Landsat 8 de la NASA. (Fuente: Google imágenes)..... | 19 |
| Figura 6. Propagación de la energía electromagnética; en naranja la onda magnética y en blanco la onda eléctrica. (Fuente: [9]) | 24 |
| Figura 7. Espectro electromagnético y longitud de onda en metros. (Fuente: Apuntes de astronomía de Mauricio Acevedo)..... | 25 |
| Figura 8. Diferencia de cambio de resolución espacial para una misma imagen. A la izquierda mayor resolución que a la derecha. (Fuente: Google imágenes)..... | 26 |
| Figura 9. Ejemplo de resolución espectral. A la izquierda esquema con una sola banda, a la derecha mismo esquema con tres bandas. (Fuente: Elaboración propia)..... | 27 |
| Figura 10. Ejemplo de una imagen de la ciudad de Las Vegas a 8 bits ,imagen de la izquierda, y a 2 bits, imagen de la derecha. (Fuente: Imagen de Landsat 8 y cambio de su resolución radiométrica en QGIS)..... | 27 |
| Figura 11. Imagen meteorológica que muestra el avance del huracán Isaac en el Golfo de México en agosto de 2012. (Fuente: ESA) | 28 |
| Figura 12. Satélites del programa Sentinel y sus características principales. (Fuente: Web IGN)..... | 29 |
| Figura 13. Desarrollo y evolución de los satélites Landsat a lo largo de los años. (Fuente: NASA)..... | 30 |
| Figura 14. Comparación de diferentes satélites de la NASA (Landsat 7 y 8) y de la ESA (Sentinel) con sus distintas bandas y longitudes de onda. (Fuente: USGS)..... | 31 |
| Figura 15. Todos los satélites hasta el 2005 del programa EOS. (Fuente: NASA)..... | 31 |
| Figura 16. Web de descarga de imágenes Landsat 8. https://earthexplorer.usgs.gov/ | 36 |
| Figura 17. Web de descarga de imágenes Landsat 8. https://search.remotepixel.ca/#3/40/-70.5 | 36 |
| Figura 18. Imagen del posicionamiento y de las órbitas de los satélites Terra, Aqua y Landsat 8 entre otros. Imagen a tiempo real a las 17:00 el 18/06/2019. http://live.farearth.com/observer/ | 37 |

| | |
|--|----|
| Figura 19. Ejemplo de órbita del satélite Terra para el 15 de junio de 2019. https://www.ssec.wisc.edu/datacenter/terra/ | 38 |
| Figura 20. Ejemplo de órbita del satélite Aqua para el 15 de junio de 2019. https://www.ssec.wisc.edu/datacenter/aqua/ | 38 |
| Figura 21. Web de descarga de imágenes MODIS. Selección de productos. https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/order | 40 |
| Figura 22. Web de descarga de imágenes MODIS. Visualización de la imagen y parámetros del post-procesamiento a la hora de descargar. | 40 |
| Figura 23. Flujo de correcciones de imágenes Landsat 8 y Terra, desde los Niveles Digitales (ND) a la Temperatura Superficial Terrestre. (Fuente: Elaboración propia)..... | 41 |
| Figura 24. Ejemplo de cambio de resolución. (Fuente: Elaboración propia)..... | 42 |
| Figura 25. Diferencia entre proyección sinusoidal (izquierda) y proyección UTM (derecha). (Fuente: Software PJ_Japan)..... | 42 |
| Figura 26. Web de descarga de imágenes MODIS; LAADS DAAC. Apartado "Review & Order". (Fuente: Elaboración propia) | 43 |
| Figura 27. Métodos de remuestreo desde la web de descarga LAADS DAAC. (Fuente: Elaboración propia)..... | 43 |
| Figura 28. Coeficientes de calibración en los metadatos de una imagen de Landsat 8. (Fuente: Elaboración propia)..... | 44 |
| Figura 29. Imágenes del satélite Landsat 8 de la zona de Ávila. A la izquierda imagen azulada con efectos atmosféricos a la derecha imagen corregida de efectos atmosféricos. (Fuente: Web Remotepixel) | 46 |
| Figura 30. Ejemplo de imagen del satélite Landsat 8. Los bordes de la imagen muestran un marco negro para indicar los píxeles sin datos, estos son los que deben quedar fuera del cálculo del número total de píxeles. (Fuente: descarga desde la web Remotepixel) | 48 |
| Figura 31. Diagrama de los distintos métodos para obtener la temperatura superficial terrestre a partir de imágenes de satélite. Los métodos marcados con un tic verde serán los desarrollados en este trabajo. (Fuente: Elaboración propia)..... | 55 |
| Figura 32. Esquema del recorrido de la radiación para la obtención de la ecuación de transferencia radiativa. (Fuente: Elaboración propia) | 56 |
| Figura 33. Gráfica de espectro de transmisividad atmosférica total y el espectro de transmisividad asociado a algunos componentes atmosféricos, como por ejemplo el vapor de agua. (Fuente: [22]) | 58 |
| Figura 34. Gráfica de transmisividad atmosféricas para diferentes atmósferas de referencia: estándar a latitud media en verano (rojo) y en invierno (rosa), estándar a | |

| | |
|---|----|
| latitud subártica en verano (verde) y en invierno (negro), y tropical (azul). (Fuente: [22]) | 59 |
| Figura 35. Ejemplos de parámetros de entrada de la zona de la Escuela Politécnica Superior de Ávila para el 22/01/2019 sin introducir condiciones de superficie, para los que se desea calcular la transmisión atmosférica y la luminosidad. (Fuente: Elaboración propia) | 61 |
| Figura 36. Resultados de los parámetros de corrección atmosférica para el ejemplo anterior. (Fuente: Elaboración propia) | 61 |
| Figura 37. Esquema de trabajo del método Monocanal. (Fuente: Elaboración propia) | 62 |
| Figura 38. Esquema de trabajo del método Monocanal. (Fuente: Elaboración propia) | 64 |
| Figura 39. Imagen de funciones espectrales para obtener los valores de las funciones atmosféricas a partir de la longitud de onda de la banda térmica utilizada. | 64 |
| Figura 40. Esquema de trabajo del método Split-Window 1. (Fuente: Elaboración propia) | 66 |
| Figura 41. Esquema de trabajo del método Split-Window 2. (Fuente: Elaboración propia) | 67 |
| Figura 42. Coeficientes para el método Split-Window 2. (Fuente: [19]) | 68 |
| Figura 43. Esquema de trabajo del método simplificado. (Fuente: Elaboración propia) | 69 |
| Figura 44. Proyección cartográfica cónica de Albers Equal Area (AEA) usada para los datos ARD. (Fuente: Software PJ_Japan) | 73 |
| Figura 45. Rejilla de imágenes de ARD para Estados Unidos. (Fuente: [30]) | 73 |
| Figura 46. Carpetas de descarga de datos ARD en earthexplorer. (Fuente: Elaboración propia) | 74 |
| Figura 47. Archivos "Provisional Surface Temperature". Marcado archivo de temperatura superficial terrestre provisional. (Fuente: Elaboración propia) | 74 |
| Figura 48. Archivos "Top of Atmosphere". Marcados archivos de reflectancia TOA para las bandas 4 y 5. (Fuente: Elaboración propia) | 75 |
| Figura 49. Archivos "Brightness Temperature". Marcados archivos de temperatura de brillo para las bandas 10 y 11. (Fuente: Elaboración propia) | 75 |
| Figura 50. Archivos "Surface Reflectance". Marcados archivos de reflectancia de la superficie terrestre para las bandas 4 y 5. (Fuente: Elaboración propia) | 75 |
| Figura 51. Proceso de trabajo para las imágenes ARD; transformación de la proyección AEA a la proyección UTM y recorte de la zona deseada con una resolución espacial de treinta metros. (Fuente: Elaboración propia) | 76 |

| | |
|--|----|
| Figura 52. Ejemplo de remuestreo y reproyección (imagen izquierda), y recorte (imagen derecha) desde QGIS (Fuente: Elaboración propia)..... | 77 |
| Figura 53. Mapa de EE.UU. con los puntos de las zonas estudiadas. Rojo zonas de cultivos, amarillo zonas dérticas, verde zonas forestales y azul zonas urbanas. (Fuente: Elaboración propia)..... | 79 |
| Figura 54. Esquema del "Método mejorado". (Fuente: Elaboración propia)..... | 86 |
| Figura 55. Imágenes de temperatura superficial terrestre de la imagen desértica de Amarillo del 22 de diciembre de 2018: a) Imagen ARD, b) Monocanal 2, c) Monocanal 1 y d) método mejorado. Escala en Kelvin. (Fuente: Elaboración propia)..... | 90 |
| Figura 56. Imágenes de la diferencia de temperatura superficial terrestre, de la desértica de Amarillo del 22 de diciembre de 2018, de la Imagen ARD frente a: a) Monocanal 2 y/o mejorado, b) Monocanal 1. Escala en Kelvin. (Fuente: Elaboración propia) | 90 |
| Figura 57. Imágenes de temperatura superficial terrestre de la imagen forestal de Alabama del 25 de octubre de 2018: a) Imagen ARD, b) Monocanal 2, c) Monocanal 1 y d) método mejorado. Escala en Kelvin. (Fuente: Elaboración propia) | 91 |
| Figura 58. Imágenes de la diferencia de temperatura superficial terrestre, de la imagen forestal de Alabama del 25 de octubre de 2018, de la Imagen ARD frente a: a) Monocanal 2, b) Monocanal 1 y c) método mejorado. Escala en Kelvin. (Fuente: Elaboración propia)..... | 92 |
| Figura 59. Zoom de la Figura 58 donde se aprecia la mejoría del método mejorado frente al método Monocanal 1. (Fuente: Elaboración propia) | 92 |
| Figura 60. Imágenes de temperatura superficial terrestre de la imagen de cultivo de Burley del 8 de agosto de 2018: a) Imagen ARD, b) Monocanal 2, c) Monocanal 1 y d) método mejorado. Escala en Kelvin. (Fuente: Elaboración propia) | 93 |
| Figura 61. Imágenes de la diferencia de temperatura superficial terrestre, de la imagen de cultivo de Burley del 8 de agosto de 2018, de la Imagen ARD frente a: a) Monocanal 2, c) Monocanal 1 y d) método mejorado. La imagen b) muestra la humedad. Escala superior en g/cm ² y escala inferior en Kelvin. (Fuente: Elaboración propia)..... | 94 |
| Figura 62. Imágenes de temperatura superficial terrestre de la imagen urbana de Springfield del 1 de agosto de 2018: a) Imagen ARD, b) Monocanal 2, c) Monocanal 1 y d) método mejorado. Escala en Kelvin. (Fuente: Elaboración propia) | 95 |
| Figura 63. . Imágenes de la diferencia de temperatura superficial terrestre, de la imagen urbana de Springfield del 1 de agosto de 2018, de la Imagen ARD frente a: a) Monocanal 2, b) Monocanal 1. Escala en Kelvin. (Fuente: Elaboración propia) | 95 |
| Figura 64. Imagen de inicio TEMISAT. (Fuente: Elaboración propia) | 97 |
| Figura 65. Ventana de GUIDE en MATLAB. (Fuente: Elaboración propia) | 99 |

| | |
|--|-----|
| Figura 66. Pantalla de inicio TEMISAT. (Fuente: Elaboración propia)..... | 100 |
| Figura 67. Pantalla "Carga de Datos" TEMISAT. (Fuente: Elaboración propia)..... | 100 |
| Figura 68. Diferencia de botones activos en la interfaz de TEMISAT dependiendo del método seleccionado; método simplificado a la izquierda y método Split-Window a la derecha. (Fuente: Elaboración propia)..... | 101 |
| Figura 69. Pantalla con imagen errónea en la carga de datos TEMISAT. (Fuente: Elaboración propia)..... | 102 |
| Figura 70. Pantalla "Cálculo de Temperatura Superficial" TEMISAT. (Fuente: Elaboración propia)..... | 102 |
| Figura 71. Opciones de imágenes a visualizar en TEMISAT. (Fuente: Elaboración propia)..... | 103 |
| Figura 72. Ejemplos de uso de las herramientas de visualización TEMISAT. (Fuente: Elaboración propia)..... | 103 |
| Figura 73. Pantalla "Guardar Imágenes" TEMISAT. (Fuente: Elaboración propia)..... | 104 |
| Figura 74. Ejemplo de archivo HTML abierto con el Bloc de notas de Windows. (Fuente: Elaboración propia)..... | 105 |
| Figura 75. Ejemplo de archivo HTML abierto con TextPad. (Fuente: Elaboración propia)..... | 106 |
| Figura 76. Presentación de la ayuda del programa TEMISAT. (Fuente: Elaboración propia)..... | 107 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Especificaciones de productos Landsat 8 de nivel 1. (Fuente: [15])..... | 35 |
| Tabla 2. Productos de nivel 1 de Landsat 8. (Fuente: [15])..... | 35 |
| Tabla 3. Información de las imágenes del vapor de agua total precipitable. (Fuente: LADSWEB. NASA) | 39 |
| Tabla 4. Comparativa del sistema de referencia, proyección cartográfica y resolución espacial entre los sensores de Landsat 8 y MODIS. (Fuente: Elaboración propia) | 41 |
| Tabla 5. Métodos de corrección atmosférica basada en la imagen. (Fuente: Elaboración propia)..... | 47 |
| Tabla 6. Comparativa de los valores de constantes de conversión (K1 y K2) para distintos sensores térmicos de Landsat (Figura 14). (Fuente: Elaboración propia) | 50 |
| Tabla 7. Comparativa de valores de emisividad (de suelo y vegetación) para las distintas bandas térmicas de Landsat 8. (Fuente: Elaboración propia) | 52 |
| Tabla 8. Valores de NDVI para diferentes superficies. (Fuente: Elaboración propia) | 53 |
| Tabla 9. Coeficientes Split-Window 1. (Fuente: Elaboración propia)..... | 67 |
| Tabla 10. Error medio cuadrático de reflectancia de superficie, para las bandas 4 y 5, y la temperatura de brillo, en las bandas 10 y 11, entre los cálculos propios (elaborados con Matlab) y los resultados del plugin "Semi-Automatic Classification" de QGIS y los datos directos de las imágenes ARD (Fuente: Elaboración propia)..... | 77 |
| Tabla 11. Diferentes tipos de corrección atmosférica en el espectro óptico usadas, para este trabajo y en la NASA para las imágenes ARD. (Fuente: Elaboración propia)..... | 78 |
| Tabla 12. Resultados del error medio cuadrático entre las imágenes ARD y los diferentes métodos de obtención de temperatura superficial terrestre. Remarcados los métodos Monocanal 1 (azul), Monocanal 2 (Morado) y simplificado (rojo). (Fuente: Elaboración propia)..... | 80 |
| Tabla 13. Resumen de los mejores y peores métodos en comparación con la imagen de temperatura superficial de las imágenes ARD, ordenados en función de su humedad media. (Fuente: Elaboración propia)..... | 83 |
| Tabla 14. Métodos de corrección atmosférica en el espectro térmico que más se aproximan a los resultados obtenidos para nuestros casos de estudios de imágenes ARD. Ordenado por la humedad media MODIS de cada imagen. (Fuente: Elaboración propia) | 83 |
| Tabla 15. Métodos de corrección atmosférica en el espectro térmico que más se aproximan a los resultados obtenidos para nuestros casos de estudios de imágenes ARD. Ordenado por la temperatura superficial media ARD de cada imagen. (Fuente: Elaboración propia) | 84 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 16. Métodos de corrección atmosférica en el espectro térmico que más se aproximan a los resultados obtenidos para nuestros casos de estudios de imágenes ARD. Ordenado por la temperatura superficial media ARD de cada imagen. (Fuente: Elaboración propia) | 85 |
| Tabla 17. Resultados del error medio cuadráticos entre las imágenes ARD y el método mejorado. (Fuente: Elaboración propia) | 88 |
| Tabla 18. Tabla que muestra las imágenes necesarias, y por tanto pestañas activas, dependiendo del método seleccionado. (Fuente: Elaboración propia) | 101 |
| Tabla 19. Imágenes de salida en el programa TEMISAT dependiendo del método de cálculo de temperatura superficial seleccionado. (Fuente: Elaboración propia) | 104 |

1. Introducción

En las últimas décadas, el cambio climático y el calentamiento global se han convertido en una de las principales preocupaciones sociales, económicas y políticas, por ello no es extraño ver noticias que demuestran cada día la existencia de dicho efecto sobre la tierra y sus consecuencias, por ejemplo, estudios recientes han demostrado que el promedio de la temperatura superficial terrestre entre el año 2000 y 2016 fue de 1°C por encima de los valores entre 1975 y 2000 [24], esto puede apreciarse en mayor medida en la Figura 1.

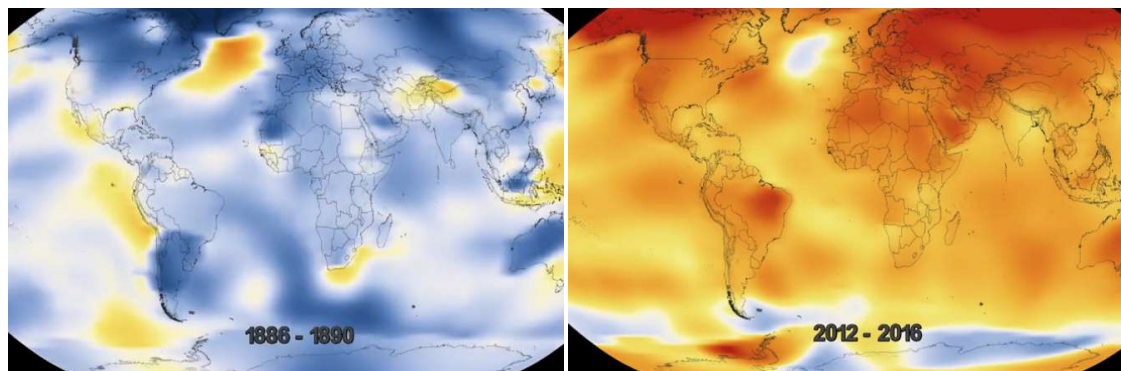


Figura 1. Diferencia de temperatura global de los años 1886/1890 y los años 2012/2016. (Fuente: Animación NASA)

Esta subida de temperaturas medias del planeta es una de las principales consecuencias del cambio climático, lo que ha provocado diferentes procesos anómalos como el aumento en el ritmo del deshielo de los polos y glaciares, aproximadamente el doble de lo normal desde comienzos del siglo XXI, esta tendencia puede comprobarse en la Figura 2. La agencia del clima de EE.UU. afirma que en 2100 el Polo Norte se habrá derretido casi por completo, con los consecuentes problemas de aumento de nivel de mares y océanos.

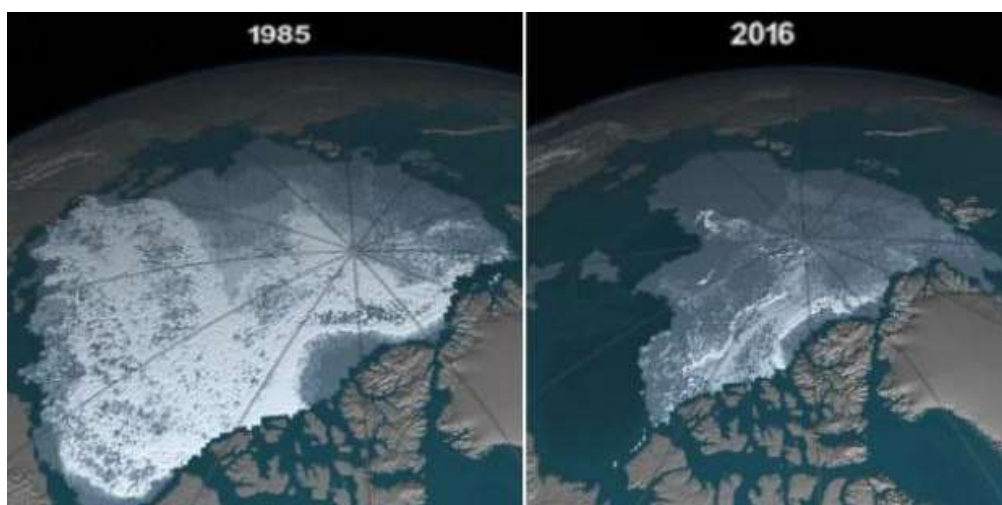


Figura 2. Representación de la diferencia del hielo del Ártico de 1985 y 2016. (Fuente: NASA)

1. Introducción

Paula de Andrés Anaya

Pero el deshielo no es el único problema que acarrea el calentamiento global, sino que también se incrementan las condiciones climáticas extremas como inundaciones, huracanes, olas de calor, etc. El aumento de la temperatura es el responsable de la escasez de lluvias y la sequía, por ejemplo en el caso de España, el año 2017 fue uno de los más secos desde 1965 [25] ya que las precipitaciones fueron inferiores a otros años en un 20%. Este problema fue notable sobretodo en cultivos y embalses, por lo que afectó a toda la población española, tanto directa como indirectamente (Figura 3).



Figura 3. Imagen del río Guadiana en época de sequía. (Fuente: Google imágenes)

Deshielo, desertización, incendios, pérdida de biodiversidad... todos ellos, entre otros, son los problemas que acarrea el calentamiento global, por lo que es lógico buscar una solución a dicho problema, pero para ello es necesario identificarlo, es decir, geolocalizar, cuantificar y monitorizar el problema, ya que sin datos geográficos y numéricos sería difícil abordar la situación.

La cuantificación de la temperatura superficial terrestre no solo es útil para evidenciar el calentamiento global, sino que es importante también para problemas tan cotidianos como el cuidado y elección de cultivos en agricultura [1], la prevención de incendios forestales, la evaluación de áreas de potencial geotérmico [2] o la estimación de diferentes variables como la evapotranspiración para temas de interés ambiental, entre otros.



Figura 4. Cultivo de soja afectado por la sequía. (Fuente: Google imágenes)

El problema del aumento de la temperatura superficial terrestre es un problema global, por lo que su monitorización debe ser posible en cualquier parte de la Tierra. Si además se pretende que esta monitorización sea para áreas geográficas extensas únicamente será posible mediante **técnicas geomáticas**.

La geomática es la ciencia que se encarga de la captura, tratamiento, análisis, interpretación, difusión y almacenamiento de la información geoespacial mediante diferentes técnicas, y juega un papel muy importante en este sentido. La geomática opera en campos muy variados entre los que se encuentra la **Teledetección**, rama de la geomática que tiene como objetivo la captura, tratamiento y análisis de imágenes digitales tomadas desde satélites artificiales [9]. La teledetección se posiciona como principal alternativa para la cuantificación y evolución a lo largo del tiempo de la temperatura superficial terrestre, y las imágenes satelitales serán la raíz del trabajo.

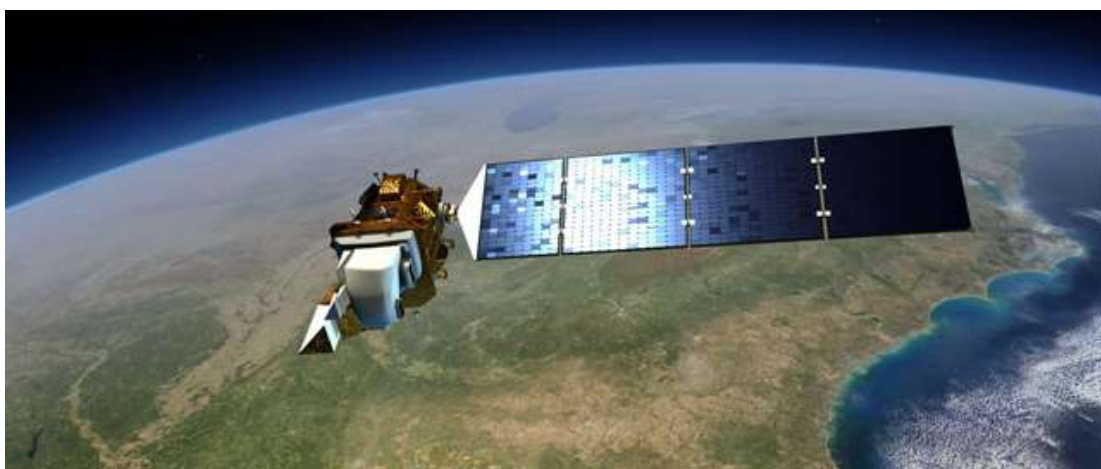


Figura 5. Satélite Landsat 8 de la NASA. (Fuente: Google imágenes)

1. Introducción

Paula de Andrés Anaya

En base a ello, el presente trabajo fin de grado busca hacer un estudio profundo de las diferentes metodologías existentes para el cálculo de la temperatura superficial terrestre mediante diferentes imágenes satelitales, así como desarrollar un software que permita automatizar el cálculo con cada una de las metodologías estudiadas. Se establece así una solución para el cálculo ágil de la temperatura superficial terrestre a partir de imágenes satelitales, proceso hasta ahora limitado a la implementación de las ecuaciones por cada usuario.

2. Objetivos

El objetivo general que se pretende conseguir con este trabajo es el **desarrollo de un software informático capaz de estimar la temperatura superficial terrestre** de cualquier lugar de la Tierra utilizando únicamente como datos de partida imágenes satelitales.

Este objetivo general traerá consigo una serie de objetivos específicos que se deberán alcanzar previamente:

- Tratamiento de imágenes satelitales procedentes de diferentes plataformas desde su descarga hasta su manipulación pasando por la aplicación de diferentes correcciones.
- Evaluación del efecto de la atmósfera en la adquisición de datos, en forma de imágenes, desde el espacio, y determinación de las metodologías de compensación del mismo.
- Estudio y análisis de las diferentes metodologías de cálculo de temperatura superficial a partir de imágenes de satélite existentes dentro de la comunidad científica.
- Evaluación de los resultados obtenidos en diferentes zonas geográficas y diferentes periodos temporales frente a imágenes Analysis Ready Data (ARD).
- Perfeccionar los conocimientos tanto en lenguaje de programación como en programación orientada a objetos, y así desarrollar un nuevo software informático.

3. Fundamentos básicos de la teledetección: Imágenes de Satélite

3.1. ¿Qué es la teledetección?

El origen del término teledetección viene del francés "télédétection", traducción del año 1967 del término anglosajón "*remote sensing*", que significa observación remota. La teledetección ha adquirido numerosos significados a lo largo del tiempo como *"el registro de información de un objeto sin entrar en contacto material con él en las regiones del ultravioleta, visible, infrarrojo y microondas, por medio de instrumentos como escáneres y cámaras localizadas en plataformas móviles y el análisis de la información adquirida por medio de técnicas de fotointerpretación, interpretación de imágenes y procesado de las mismas"* (Sabins, 1978) [7], o *"la ciencia y arte de identificar, observar y medir un objeto sin entrar en contacto directo con él, implica la detección y medición de la radiación de diferentes longitudes de onda reflejadas o emitidas desde objetos o materiales distantes, por lo que se pueden identificar y clasificar por tipo, sustancia y distribución espacial"* (Steve Graham 1999). Pero quizás la definición más sencilla y que mejor engloba este término es *"la técnica que tiene por objeto la captura, tratamiento y análisis de imágenes digitales tomadas desde satélites artificiales"* [9].

Para que la observación y captura de imágenes del satélite a la Tierra sea posible sin contacto material, debe haber alguna clase de interacción entre la superficie terrestre y el sensor a bordo del satélite, esta interacción es el flujo de radiación que va del objeto al sensor

Dependiendo del flujo de radiación existen dos tipos de teledetección:

- Teledetección activa: cuando la energía medida es emitida por el sensor de una plataforma. Sus satélites utilizan sensores activos, como los sensores radar.
- Teledetección pasiva: cuando la energía medida es emitida por el Sol. Sus satélites utilizan sensores pasivos.

Los sensores pasivos son aquellos que miden la radiación electromagnética reflejada por los objetos (luz visible e infrarrojo) y la radiación terrestre emitida por los objetos (infrarrojo térmico).

3.2. Principios físicos y componentes

Los principios físicos de la teledetección se basan en la medida de la radiación electromagnética, emitida o reflejada por los objetos.

La energía electromagnética es un tipo de energía que se transmite por el espacio en forma de onda. Esta onda magnética se origina de la propagación simultánea de un campo eléctrico y un campo magnético, ambas magnitudes perpendiculares, tal y como muestra la Figura 6, por la forma en la que se propagan. La teoría ondulatoria se explica sobre la base de los conceptos fundamentales de longitud de onda y frecuencia.

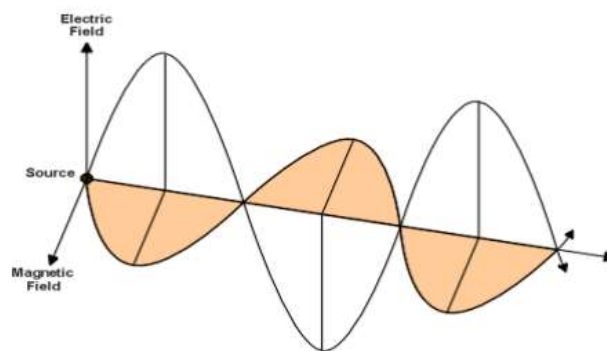


Figura 6. Propagación de la energía electromagnética; en naranja la onda magnética y en blanco la onda eléctrica. (Fuente: [9])

La fórmula esencial en la que se basa la teoría ondulatoria es la siguiente:

$$c = \lambda \cdot F$$

Siendo:

c : la velocidad de propagación de la luz en el vacío. $c = 2.9979 \cdot 10^8$ m/s

λ : la longitud de onda, es la distancia que recorre la onda en el intervalo de tiempo que transcurre entre dos picos máximos.

F : la frecuencia, es el número de ondas que pasan por un punto durante un periodo de tiempo. Por lo tanto, tal y como se aprecia en la fórmula, la frecuencia depende de la longitud de onda y de la velocidad de propagación de la luz en el vacío.

Ambas magnitudes permiten clasificar los diferentes tipos de energía electromagnética y en conjunto reciben el nombre de espectro electromagnético.

3.3. Espectro electromagnético

La radiación electromagnética se clasifica con el **espectro electromagnético** este se conoce como "el sistema de clasificación por longitudes de onda de toda la energía que se mueve, armónicamente, a la velocidad de la luz" (NASA,2013) [8].

Los sensores pasivos miden la energía en el espectro visible, comprendida entre 0.4 y 0.7 micras, e infrarroja, entre 0.7 y 100 micras, tal y como muestra la Figura 7.

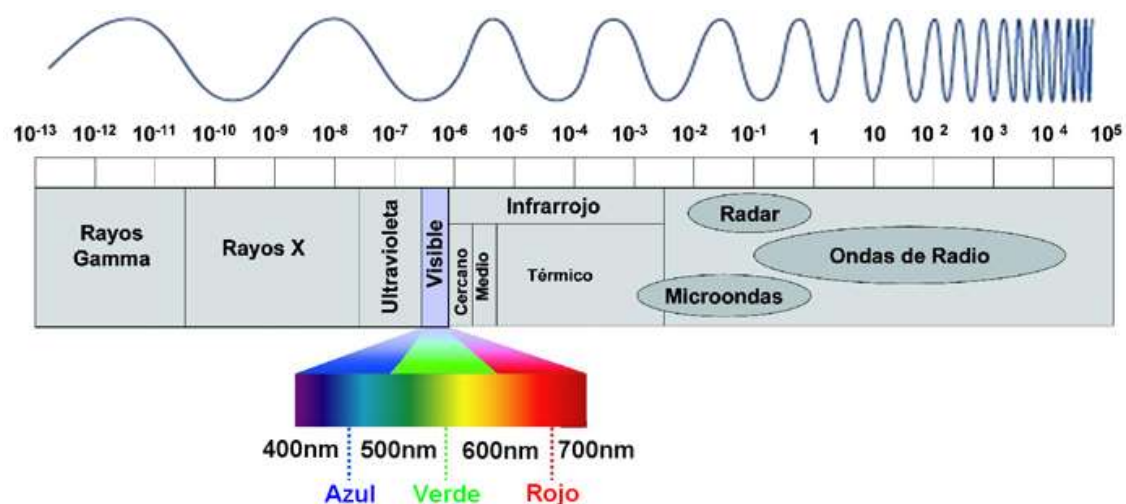


Figura 7. Espectro electromagnético y longitud de onda en metros. (Fuente: Apuntes de astronomía de Mauricio Acevedo)

La radiación infrarroja es emitida por cualquier cuerpo cuya temperatura sea mayor que cero absoluto (0 K), por ello la radiación térmica infrarroja, la que va de 3 a 100 micras aproximadamente, es comúnmente conocida con el término **calor**. Hay que tener en cuenta que la radiación emitida de un cuerpo es proporcional a su temperatura.

Los sensores a bordo de los satélites miden la radiación electromagnética en rangos específicos, comúnmente conocidos como **bandas**. El número de bandas varía considerablemente de unos sensores a otros

3.4. Resoluciones de un sensor

El resultado de medir la energía electromagnética en el espectro visible, tras unas transformaciones y cálculos, son una serie de imágenes digitales, donde cada píxel tiene un valor discreto en unidades de "Digital Number" o Niveles Digitales (DN) [8]. Estas imágenes digitales tendrán diferentes resoluciones dependiendo del sensor con el que se obtiene. Las diferentes resoluciones que existen son la espacial, espectral, radiométrica y temporal [9].

3. Fundamentos básicos de la teledetección: imágenes de satélite

Paula de Andrés Anaya

- **Resolución espacial o geométrica:** es el tamaño del objeto más pequeño que puede ser distinguido en una imagen, es decir, es el tamaño medio del píxel sobre el terreno. También se le denomina **I_{FOV}**, aunque este es más bien el ángulo subtendido en el satélite por el píxel (Instantaneous Field of View). El tamaño medio del píxel varía en función de distintos factores; altura orbital, longitud focal, velocidad de exploración del satélite, número de detectores montados en el sensor y su tamaño.

Esta resolución es importante ya que marca el nivel de detalle que ofrece la imagen. A menor tamaño de píxel, mejor resolución geométrica tendrá la imagen, y por tanto mayor nivel de detalle.

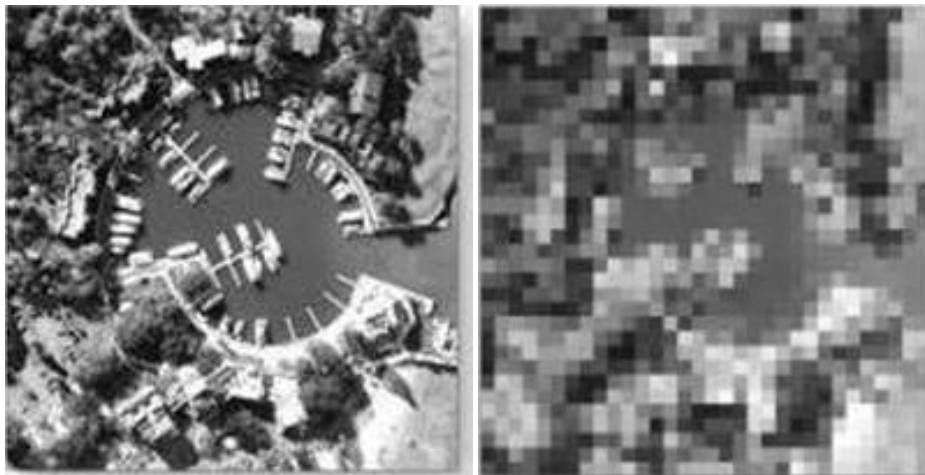


Figura 8. Diferencia de cambio de resolución espacial para una misma imagen. A la izquierda mayor resolución que a la derecha. (Fuente: Google imágenes)

- **Resolución espectral:** es el número y anchura de las bandas espectrales que puede distinguir el sensor, es decir, el sensor tendrá una resolución espectral más grande cuanto mayor sea el número de bandas que proporcione.

Indica el número y la anchura de las bandas espectrales en que un sensor registra la radiación. Cuanto mayor sea el número de bandas y más estrechas sean, mejor es la resolución espectral. [7] Si las bandas son muy anchas en teoría se registra un valor promedio de radiación, y esto puede encubrir la diferencia espectral de capas de interés. Tomando como ejemplo la Figura 9, si la banda es muy ancha (imagen izquierda) apenas se reconocen las diferencias espectrales entre dos coberturas, mientras que con 3 bandas (imagen derecha) la separación es clara.

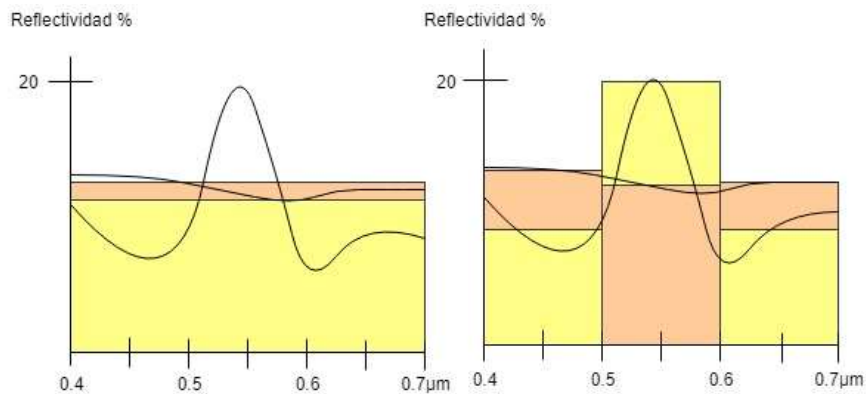


Figura 9. Ejemplo de resolución espectral. A la izquierda esquema con una sola banda, a la derecha mismo esquema con tres bandas. (Fuente: Elaboración propia)

- **Resolución radiométrica:** indica la capacidad del sensor para discriminar niveles o intensidades de radiancia, es decir, es el rango de valores de brillo (niveles de gris) disponibles que corresponden al máximo rango de DN. Cuando la energía electromagnética recibida se transforma a niveles digitales necesita un formato binario para codificarse (número de bits). A mayor número de bits mayor resolución radiométrica. Por ejemplo: una imagen con un byte (8 bits) de resolución tiene 256 niveles de brillo ($2^8=256$), lo que equivale a un rango de 0 a 255 niveles de gris. Una imagen con 2 bits tendría 4 niveles de brillo.

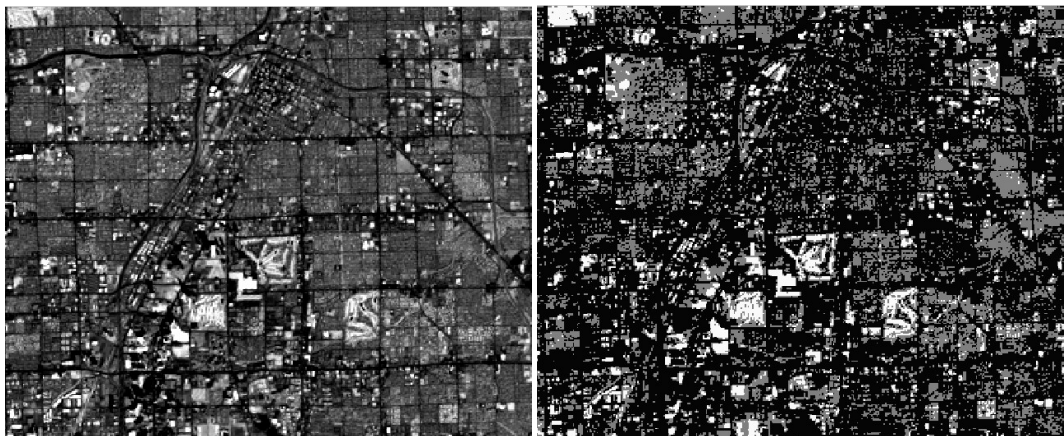


Figura 10. Ejemplo de una imagen de la ciudad de Las Vegas a 8 bits ,imagen de la izquierda, y a 2 bits, imagen de la derecha. (Fuente: Imagen de Landsat 8 y cambio de su resolución radiométrica en QGIS)

A mayor número de niveles mejor es la resolución radiométrica y mejor será la información, pero hay que tener en cuenta para que se van a usar las imágenes: para un "análisis visual" no son necesarios muchos valores ya que el ojo humano apenas puede percibir 64 tonos de gris [7] pero para el tratamiento informático una mayor resolución puede mejorar mucho las cosas.

3. Fundamentos básicos de la teledetección: imágenes de satélite

Paula de Andrés Anaya

- **Resolución temporal:** es la frecuencia con la que el satélite es capaz de obtener imágenes de una determinada área, conocido también como intervalo de revisita. Este tiempo depende de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad e inclinación) y del diseño del sensor (ángulo de observación y abertura).

La resolución temporal es de gran importancia para el monitoreo de eventos como por ejemplo inundaciones, incendios o desastres naturales. Por ejemplo, los satélites meteorológicos son de los que mejor resolución temporal tienen (Figura 11).



Figura 11. Imagen meteorológica que muestra el avance del huracán Isaac en el Golfo de México en agosto de 2012. (Fuente: ESA)

A continuación, se explicarán algunos de los programas de observación terrestre gracias a los cuales se obtienen imágenes satelitales.

3.5. Agencias espaciales

Las agencias espaciales son las que trabajan con temas relacionados con el espacio exterior y la exploración espacial, gracias a ellas se obtienen las imágenes satelitales. Existen numerosas agencias espaciales pero de entre todas ellas cabe destacar la ESA (European Space Agency) y la NASA (National Aeronautics and Space Administration).

- **ESA:** la Agencia Espacial Europea es la que elabora y lleva a cabo el programa espacial europeo. Estos programas se diseñan con el fin de conocer más a fondo la Tierra, el entorno espacial que la rodea, el Sistema Solar y el Universo. También desarrolla tecnologías y servicios basados en satélites y fomentar la industria europea. La ESA está compuesta por 22 Estados Miembros, entre los que se encuentra España.

La ESA presenta un amplio abanico de misiones y programas espaciales, entre los que destaca el **programa Copernicus**, antes conocido como el programa GMES. Este es el programa de observación terrestre más ambicioso de la agencia europea, diseñado para proporcionar información precisa, actualizada y de fácil acceso para mejorar la gestión del medio ambiente, comprender y mitigar los efectos del cambio climático y garantizar la seguridad ciudadana.

Dentro de este programa, las misiones más conocidas son las **Sentinel**. Cada misión Sentinel está formada por una constelación de dos satélites, lo que permite cumplir los requisitos de cobertura y frecuencia de observación a la vez que ofrecer un conjunto robusto de datos para los servicios del programa Copérnico. Podemos encontrar las misiones Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3 y Sentinel-5p, entre otras ya planteadas para un futuro no muy lejano (Figura 12).

| CONSTELACIÓN SENTINELS | | | |
|---|--|----------------------------|--|
| Constelación Sentinel. Estado | | | Características |
|  | SENTINEL-1: 9-40m resolución, 6 días revisita en ecuador | S1-A y -B en órbita | Órbita polar. Imagen radar también con nubes, de día y de noche |
|  | SENTINEL-2: 10-60m resolución, 5 días revisita | S2-A y -B en órbita | Órbita polar. Imagen multispectral óptica en alta resolución |
|  | SENTINEL-3: 300-1200m resolución, <2 días revisita | S3-A y -B en órbita | Misión óptica y altímetro de vigilancia oceánica y parámetros terrestres |
|  | SENTINEL-4: 8km resolución, 60 min revisita | Primer lanzamiento en 2020 | Vigilancia de los componentes atmosféricos en MTG-S |
|  | SENTINEL-5p: 7-68km resolución, 1 día revisita | S-5p lanzado 13/10/2017 | Misión para reducir falta de datos entre Envisat, y Sentinel 5 |
|  | SENTINEL-5: 7.5-50km resolución, 1 día revisita | Primer lanzamiento en 2021 | Vigilancia de componentes atmosféricos en MetOp 2ª Generación |
|  | SENTINEL-6: 10 días revisita | Primer lanzamiento en 2020 | Altímetro radar para medir la superficie marina de manera global. |

Figura 12. Satélites del programa Sentinel y sus características principales. (Fuente: Web IGN)

- **NASA:** es la "Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio", es la agencia espacial del gobierno de Estados Unidos. Históricamente hablando, sin duda el programa más conocido de la NASA es el programa Apollo, gracias al cual un 20 de julio de 1969, cincuenta años atrás, el hombre pisó la Luna por primera vez en la historia.

Hoy en día uno de los programas más conocidos es el programa **Landsat**. Este programa en el que trabajan de manera conjunta la NASA y el Servicio Geológico de

3. Fundamentos básicos de la teledetección: imágenes de satélite

Paula de Andrés Anaya

Estados Unidos (USGS), proporciona el mayor registro espacial de la Tierra. Es la serie de datos más larga de la historia y continúa registrando los cambios en la superficie terrestre desde el espacio. El primer satélite Landsat se lanzó en 1972 y fue de gran utilidad para la mejora de la gestión ambiental. Han pasado muchos años, con nuevos y mejorados satélites (Figura 13), en la actualidad el programa se encuentra en su octava versión, a la que se denominó "Landsat Data Continuity Mission" (LDCM).

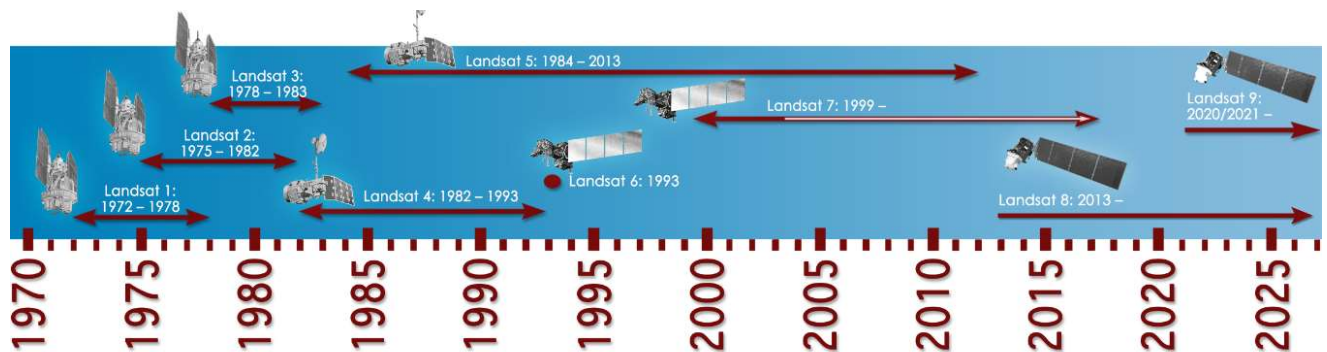


Figura 13. Desarrollo y evolución de los satélites Landsat a lo largo de los años. (Fuente: NASA)

Este satélite se renombró poco después como **Landsat 8**, se lanzó en 2013 y este ha aportado a lo largo de los últimos años amplia información sobre bosques, recursos, agua y ciudades, entre otros.

Los satélites Landsat 7 y Landsat 8 son muy similares en sus bandas espectrales pero con alguna diferencia clara, la cual se explicará a continuación.

Landsat 8 está compuesto por dos instrumentos de barrido diferentes: Operational Land Imager (OLI) y el sensor térmico infrarrojo Thermal Infrared Sensor (TIRS).

Las bandas espectrales del sensor OLI proporcionan una mejora de los instrumentos respecto de las misiones Landsat anteriores, esto se debe a la incorporación de dos bandas espectrales nuevas: la banda 1 que corresponde a un canal profundo en el azul visible, la cual se diseñó para recursos hídricos e investigación en zonas costeras, y la banda 9 que corresponde a un nuevo canal infrarrojo para la detección de nubes cirrus. El sensor TIRS recoge dos bandas espectrales, las bandas 10 y 11, a diferencia de los anteriores sensores térmicos, TM O ETM+, los cuales tenían una sola banda térmica pero que abarcaba lo correspondiente a las dos nuevas de Landsat 8.

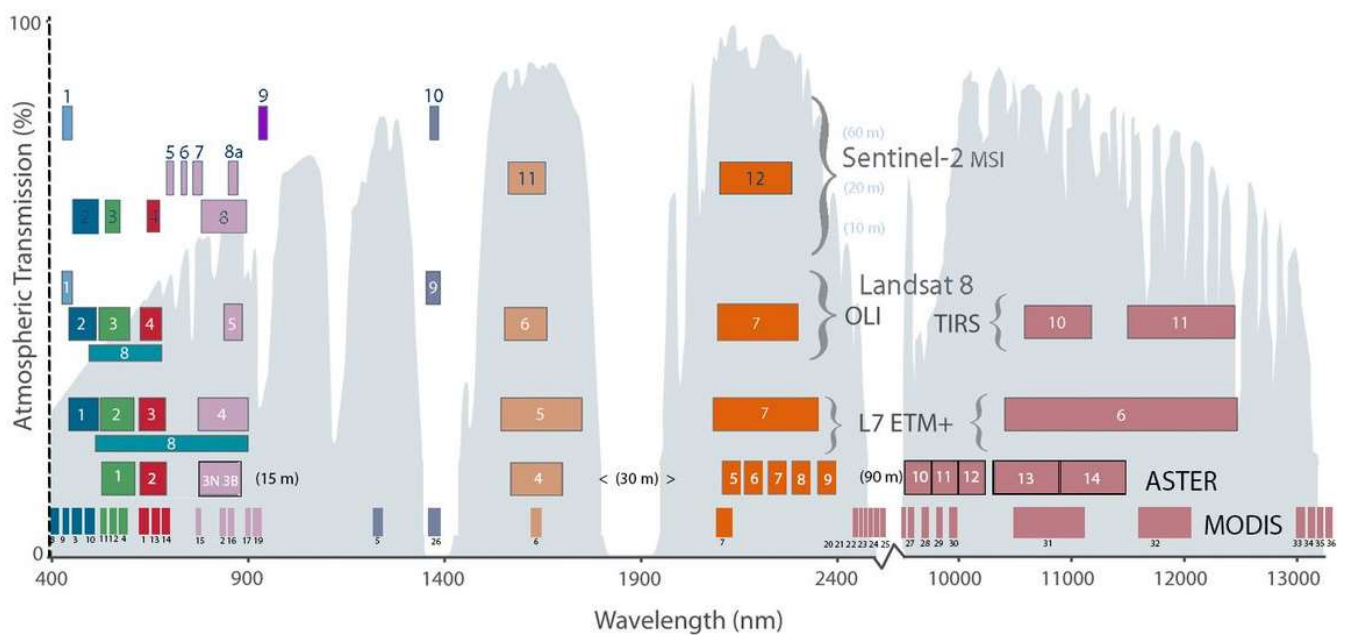


Figura 14. Comparación de diferentes satélites de la NASA (Landsat 7 y 8) y de la ESA (Sentinel) con sus distintas bandas y longitudes de onda. (Fuente: USGS)

Otro programa de la NASA que se debe mencionar es el programa **EOS**, cuyas siglas en inglés significan Sistema de Observación de la Tierra. Este programa tiene una serie de satélites diseñados para observar la superficie terrestre, la biosfera, la atmósfera y los océanos de la Tierra (Figura 15).

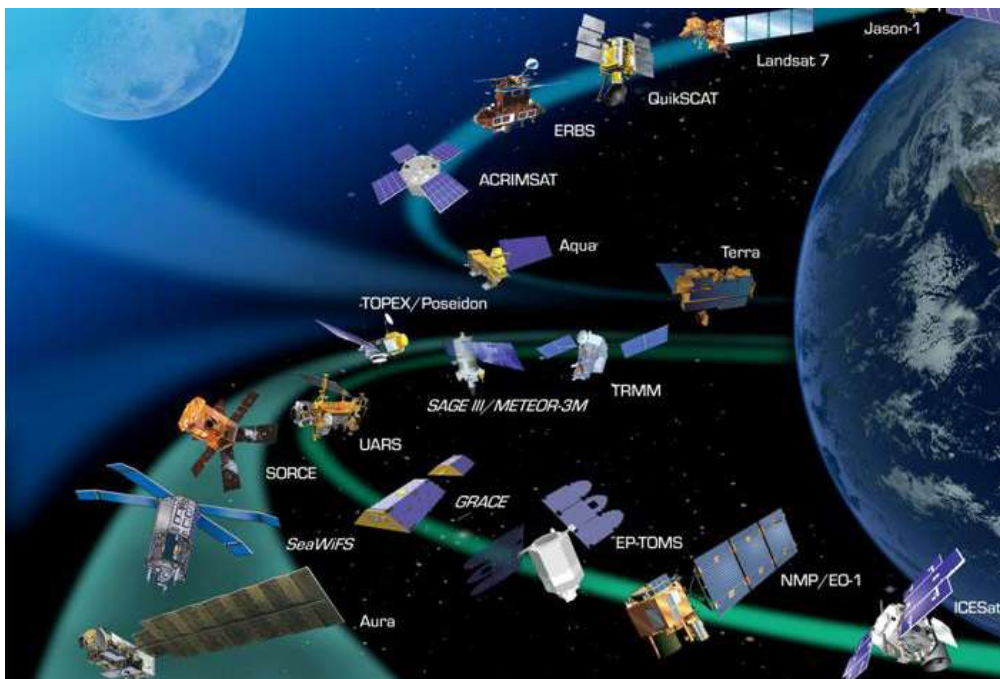


Figura 15. Todos los satélites hasta el 2005 del programa EOS. (Fuente: NASA)

3. Fundamentos básicos de la teledetección: imágenes de satélite

Paula de Andrés Anaya

Todos los satélites mencionados anteriormente se trataban de satélites de recursos naturales, es decir, aquellos de alta resolución espacial que han sido diseñados especialmente para la observación de la Tierra y la explotación de los recursos naturales, como los satélites Sentinel o Landsat, pero existen otro tipo de satélites que se encuentran en el programa EOS, entre otros, estos son los satélites meteorológicos, estos se encargan de monitorizar el tiempo atmosférico y el clima de la Tierra. Existen dos tipos de satélites meteorológicos, los que siguen una órbita geoestacionaria, como el METEOSAT de la ESA, o los que siguen una órbita polar.

Existen satélites similares a los meteorológicos pero capaces a su vez de adquirir imágenes, un ejemplo de ellos son los satélites **Terra** y **Aqua** del programa EOS, estos son una clase de satélites polares dedicados al estudio del agua.

Pero antes de comenzar a usar esta información se llevará a cabo un proceso de corrección de las imágenes digitales para obtener información fiable de ellas. Todas estas correcciones, tanto en el óptico como en el térmico, serán necesarias para obtener finalmente la temperatura superficial. A continuación, se expondrán los distintos tipos de correcciones necesarias para las imágenes de satélite.

3.6. Correcciones

Las imágenes satelitales están sometidas a una serie de interferencias que hacen que la información obtenida aparezca distorsionada por una serie de errores, por ello las primeras manipulaciones que se llevan a cabo sobre las imágenes digitales tienen como finalidad restaurar la imagen restableciendo, en la medida de lo posible, las condiciones de la toma en su origen [9]. Esto implica el desarrollo de tres tipos de correcciones:

- Corrección geométrica: tienen como finalidad reconstruir la geometría de la imagen, adoptándola a una determinada proyección cartográfica. Para denominar este tipo de operaciones se han consolidado el nombre de georreferenciación. Los procedimientos matemáticos que resuelven este problema y las metodologías usadas para su implementación mediante algoritmos en las aplicaciones informáticas de Teledetección son muy variados.
- Corrección radiométrica: pretenden restablecer los valores de los niveles digitales de la imagen depurando cualquier anomalía en su registro achacable a defectos en el sistema sensor.

- Corrección atmosférica: pretenden restablecer los valores de los niveles digitales de la imagen eliminando las distorsiones que la atmósfera introduce en los valores de radiancia que llegan al sensor desde la superficie terrestre.

4. Cálculo de la temperatura superficial terrestre mediante imágenes de satélite

4.1. Imágenes de satélite necesarias

El programa espacial utilizado para este trabajo es el **Landsat 8**, el satélite de recursos antes mencionado. La elección de este programa ha sido motivado por diferentes aspectos tales como su resolución espacial y temporal en comparación con la de otros satélites (Tabla 1), su amplio número de imágenes tanto históricas como actuales y sin lugar a duda el hecho de que todos sus productos de nivel 1 (Tabla 2) sean completamente gratuitos y de libre acceso.

Tabla 1. Especificaciones de productos Landsat 8 de nivel 1. (Fuente: [15])

| Procesamiento | Nivel 1 T-Corrección geométrica |
|------------------------------|--|
| Tamaño de píxel | -Bandas OLI multiespectrales 1-7,9: <u>30 metros</u> -Banda OLI pancromática 8: 15 metros -Bandas TIRS 10-11: tomadas con resolución de 100 metros, pero remuestreadas a <u>30 metros</u> para que coincidan con las bandas multiespectrales de OLI. |
| Características de los datos | -Formato de datos GeoTIFF -Resolución radiométrica de 12 bits. -Resolución temporal de 16 días. -Proyección cartográfica: Universal Transversal Mercator (<u>UTM</u>) (Estereográfica polar de la Antártida) -Datum al sistema geodésico Mundial (<u>WGS</u>) 84 |

Tabla 2. Productos de nivel 1 de Landsat 8. (Fuente: [15])

| | Bandas | Longitud de onda (μm) | Resolución espacial (m) |
|--|---------------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) | Banda 1- Aerosol costero | 0.43-0.45 | 30 |
| | Banda 2- Azul | 0.45-0.51 | 30 |
| | Banda 3- Verde | 0.53-0.59 | 30 |
| | Banda 4- Rojo | 0.64-0.67 | 30 |
| | Banda 5- Infrarrojo cercano (NIR) | 0.85-0.88 | 30 |
| | Banda 6- SWIR 1 | 1.57-1.65 | 30 |
| | Banda 7- SWIR 2 | 2.11-2.29 | 30 |
| | Banda 8- Pancromático | 0.50-0.68 | 15 |
| | Banda 9- Cirrus | 1.36-1.38 | 30 |
| | Banda 10- Infrarrojo térmico (TIRS) 1 | 10.60-11.19 | 100- remuestreadas a 30 |
| | Banda 11- Infrarrojo térmico (TIRS) 2 | 11.50-12.51 | 100- remuestreadas a 30 |

4. Cálculo de la temperatura superficial terrestre mediante imágenes de satélite

Paula de Andrés Anaya

Existen diferentes formas de acceder a los productos Landsat de manera gratuita, pero se mencionan las dos vías más rápidas y sencillas; la web de descarga de la USGS "earthexplorer" y la web de "remotepixel".

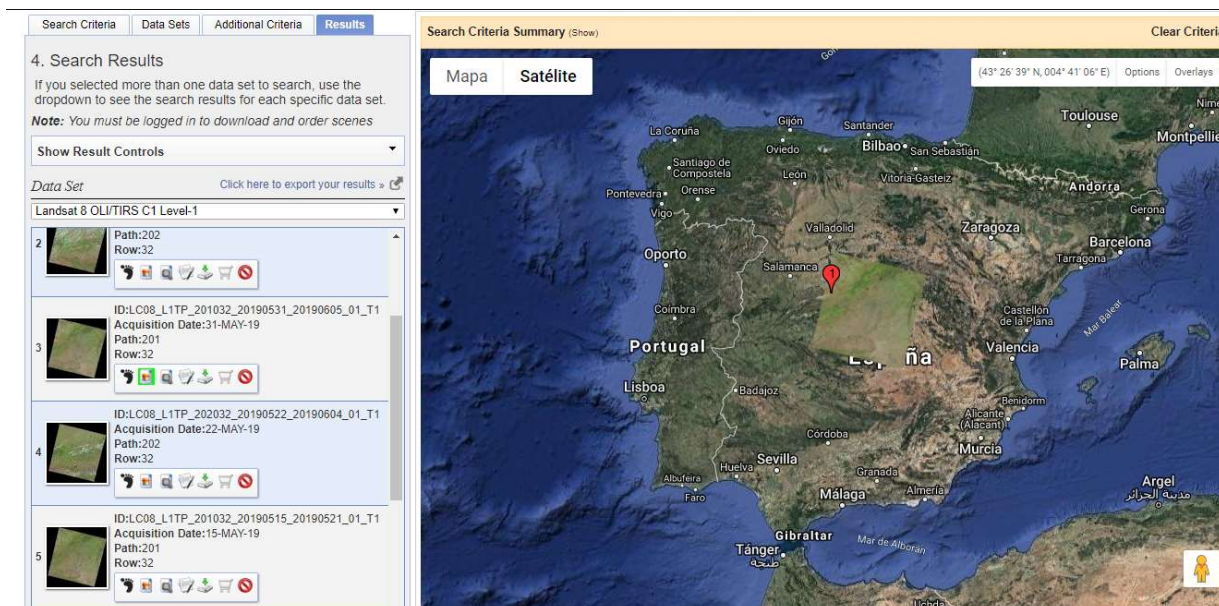


Figura 16. Web de descarga de imágenes Landsat 8. <https://earthexplorer.usgs.gov/>

La web de la USGS se considera más completa por el hecho de que no solo tiene la capacidad de descargar imágenes de nivel 1 de Landsat 8, sino que cuenta con muchos otros tipos de imágenes como las más recientes de Landsat 8; las imágenes de nivel 3. Frente a las grandes capacidades que cuenta la web de la USGS se encuentra la sencillez y la rapidez de la web de descarga "remotepixel" como otra importante alternativa para la descarga de imágenes.

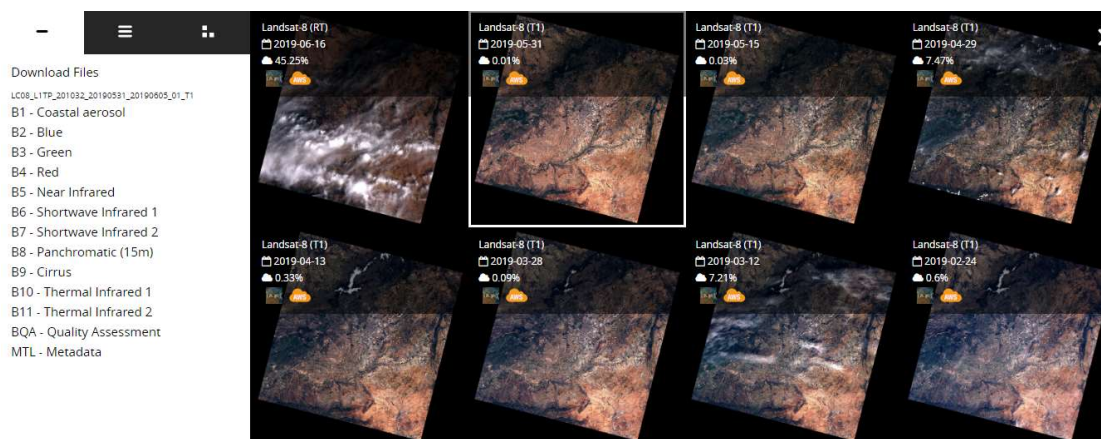


Figura 17. Web de descarga de imágenes Landsat 8. <https://search.remotepixel.ca/#3/40/-70.5>

De todas las bandas de Landsat 8, las bandas del infrarrojo térmico serán las más importantes para nuestro estudio, ya que serán las principales para el cálculo de la temperatura superficial, aunque alguna de las bandas del óptico también serán necesarias para cálculos intermedios, en concreto se utilizarán las bandas 4 y 5 del sensor OLI y 10 y 11 del sensor TIRS.

Para este trabajo no solo se utilizará un satélite de recursos de alta resolución como es el caso de Landsat 8, sino que también será necesario un satélite dedicado al estudio de la atmósfera ya que, como se verá en apartados posteriores, las condiciones climáticas y meteorológicas, entre las que se encuentra la humedad, juegan un papel muy importante en el cálculo de la temperatura superficial.

Teniendo en cuenta que se usan imágenes del satélite Landsat 8, de los satélites dedicados al estudio del agua mencionados los más importantes para este trabajo son el **Terra**, también conocido como EOS AM-1 (su órbita alrededor de la Tierra está cronometrada para que pase de norte a sur a través del ecuador por la mañana), y el **Aqua**, conocido como EOS PM-1 (al contrario que el Terra este pasa de sur a norte sobre el ecuador por la tarde). De ambos satélites el que más interesa para este proyecto es el Terra ya que su órbita es la más parecida a la de Landsat 8 (Figura 18), pero con un desfase horario de media hora aproximadamente (Terra pasa media hora antes que Landsat 8 y Aqua pasa dos horas y cuarentaicinco minutos después que Landsat 8, aproximadamente).

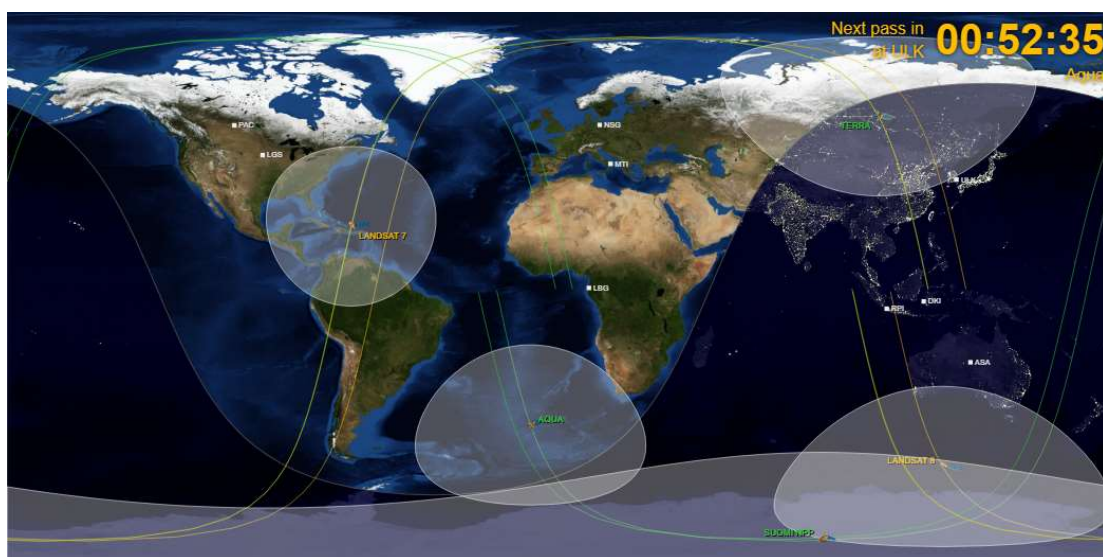


Figura 18. Imagen del posicionamiento y de las órbitas de los satélites Terra, Aqua y Landsat 8 entre otros. Imagen a tiempo real a las 17:00 el 18/06/2019. <http://live.farearth.com/observer/>

4. Cálculo de la temperatura superficial terrestre mediante imágenes de satélite

Paula de Andrés Anaya

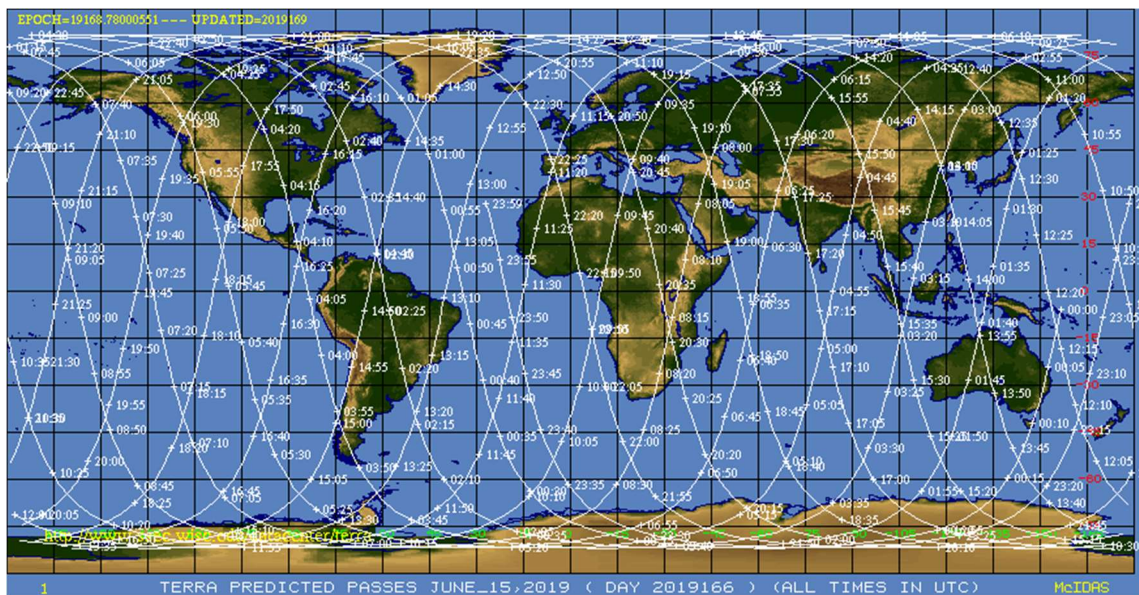


Figura 19. Ejemplo de órbita del satélite Terra para el 15 de junio de 2019.

<https://www.ssec.wisc.edu/datacenter/terra/>

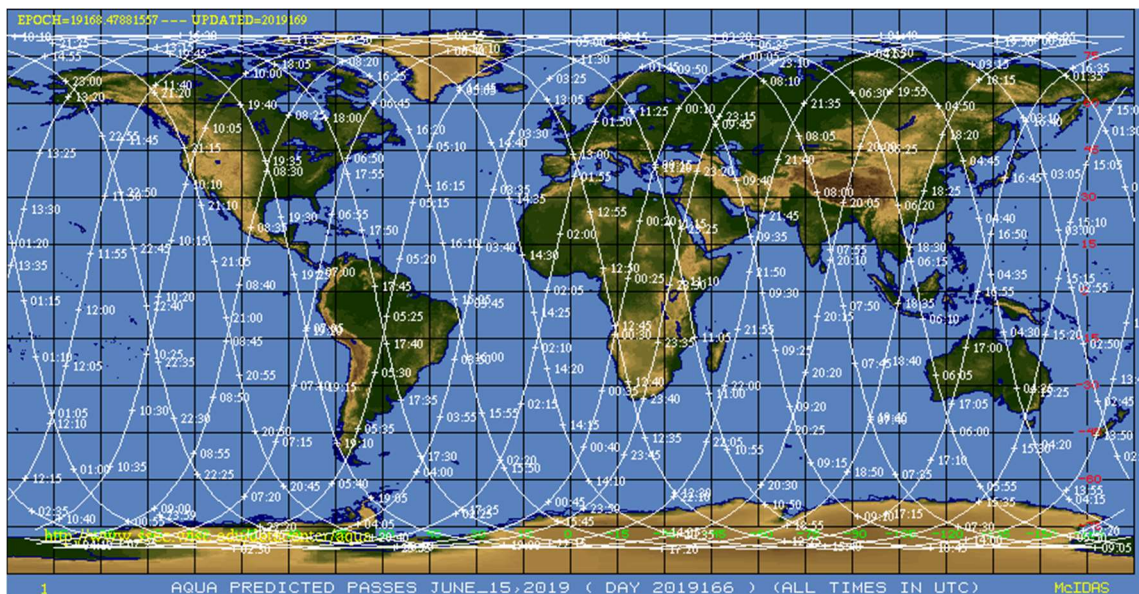


Figura 20. Ejemplo de órbita del satélite Aqua para el 15 de junio de 2019.

<https://www.ssec.wisc.edu/datacenter/aqua/>

Ambos satélites tienen en común una serie de instrumentos a bordo, entre ellos se encuentra **MODIS**, el que verdaderamente interesa para este proyecto.

MODIS, o espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada, es un instrumento que se encuentra a bordo del Terra y Aqua, tiene una resolución temporal entre de un día y cuenta con 36 bandas espectrales. MODIS mide las propiedades tanto de las nubes como de los aerosoles, también monitorea los cambios en la superficie de la Tierra e incluso monitorea la actividad fotosintética de las plantas terrestres y marinas. Por todos sus

diferentes usos, los productos MODIS se dividen en cuatro grandes disciplinas: atmósfera, tierra, océano y calibración.

La disciplina atmosférica fue desarrollada por la misión LAADS, la cual proporciona acceso público a las colecciones de datos MODIS nivel 1 y productos derivados y procesados que se conocen con el nombre de nivel 2, como es el caso de las imágenes MOD05_L2 y MYD05_L2.

MOD05_L2 y MYD05_L2 corresponden a las imágenes de vapor de agua precipitable total del satélite Terra y Aqua, respectivamente. Estos datos de nivel 2 se generan con la resolución de un kilómetro del instrumento MODIS. Para generar esta imagen se relacionan canales de absorción de vapor de agua (17, 18 y 19) con los canales de la ventana atmosférica (2 y 5). Todo su proceso de obtención viene explicado de manera detallada en la web de la NASA "Atmosphere Archive and Distribution System" (LAADS) [21].

Tabla 3. Información de las imágenes del vapor de agua total precipitable. (Fuente: LADSWEB. NASA)

| | | |
|-------------------------|------------------|------------------|
| Satélite | Terra | Aqua |
| Sensor | MODIS | MODIS |
| Nombre de la imagen | MOD05_L2 | MYD05_L2 |
| Resolución espacial | 1 km | 1 km |
| Proyección Cartográfica | Sinusoidal (SIN) | Sinusoidal (SIN) |

Tanto las imágenes de nivel 1 como las de nivel 2 de MODIS pueden obtenerse de manera gratuita desde la Web de LAADS.

4. Cálculo de la temperatura superficial terrestre mediante imágenes de satélite

Paula de Andrés Anaya

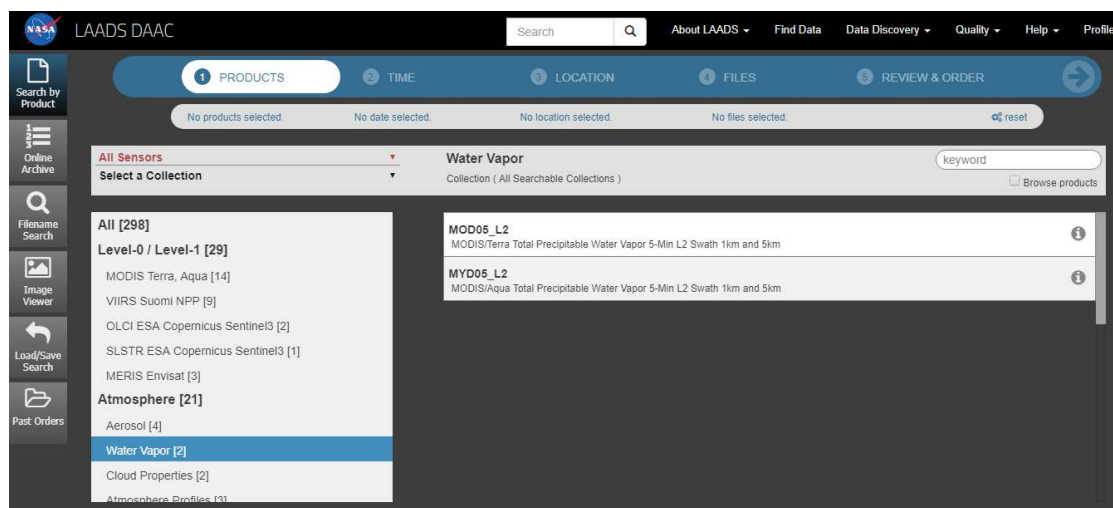


Figura 21. Web de descarga de imágenes MODIS. Selección de productos.
<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/order>

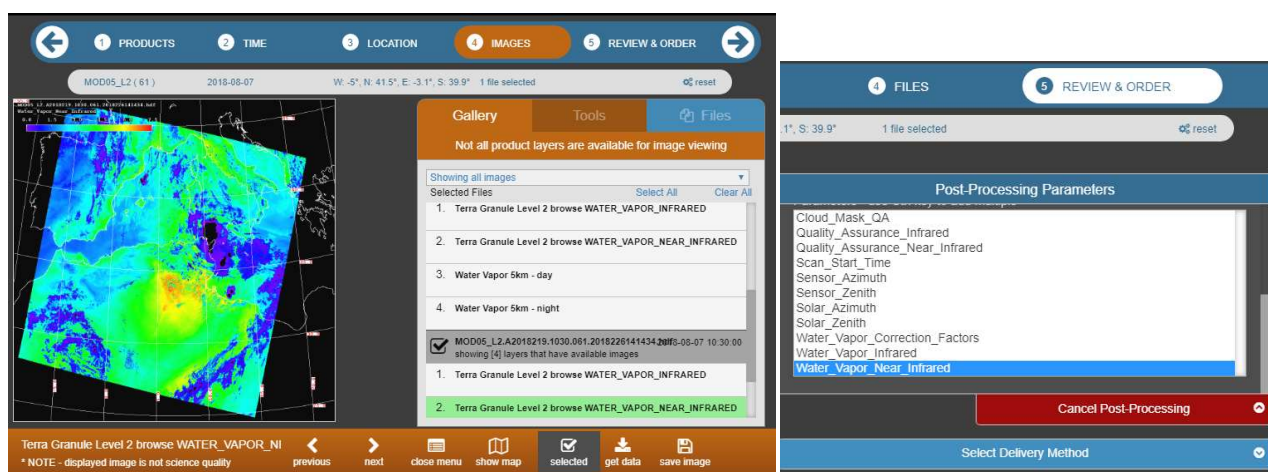


Figura 22. Web de descarga de imágenes MODIS. Visualización de la imagen y parámetros del post-procesamiento a la hora de descargar.

En resumen, las imágenes que se usan para esta práctica son las de las bandas 4, 5 10 y 11 de Landsat 8, y la imagen MOD05_L2 de la misión LAADS.

4.2. Correcciones

Como ya se mencionaba previamente en el apartado 3.6, para poder utilizar las imágenes de satélite es necesario realizar previamente una serie de correcciones; **corrección geométrica**, **corrección radiométrica** y **corrección atmosférica**, aunque en este trabajo se incorpora una nueva corrección denominada "**corrección de emisividad**", siendo en realidad una corrección atmosférica más. Teniendo en cuenta el flujo de correcciones de la Figura 23, en primer lugar, se explicará la corrección geométrica y posteriormente el resto

de las correcciones, pero agrupadas en correcciones del espectro óptico y correcciones del espectro térmico.

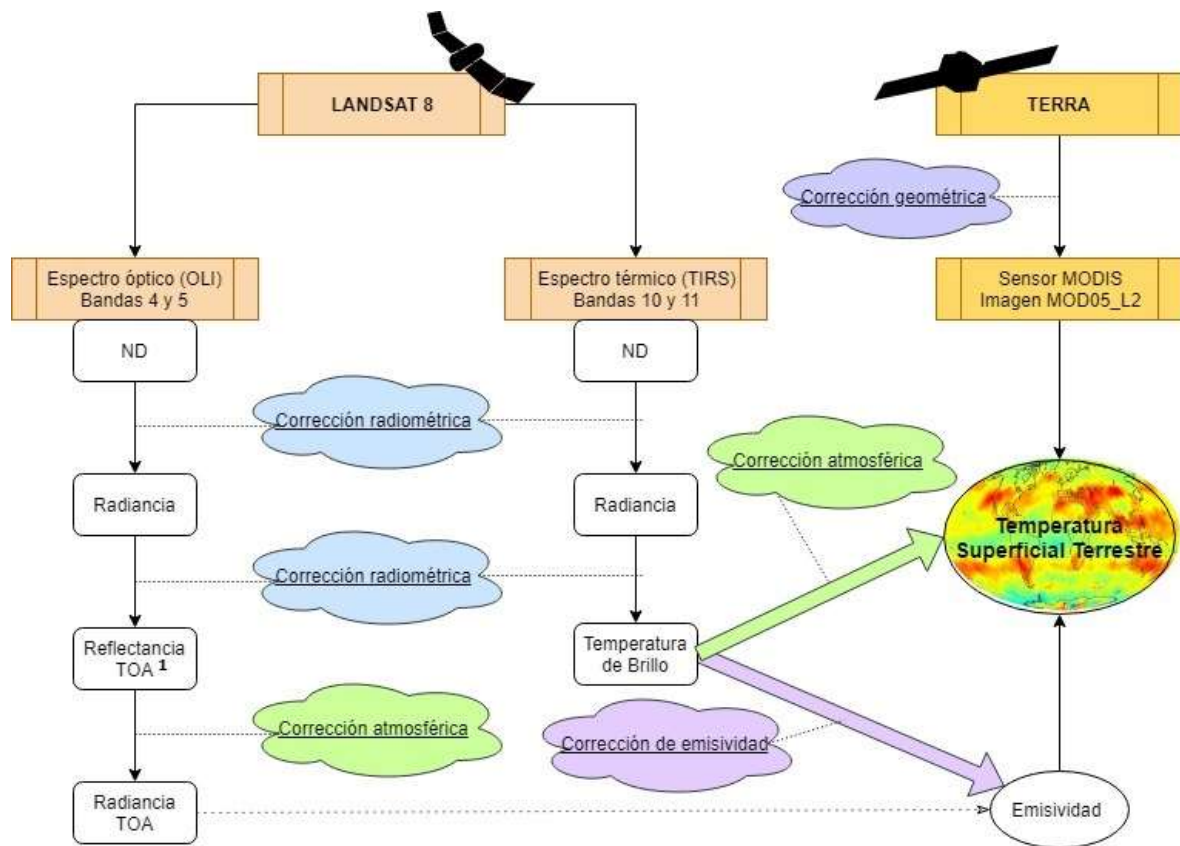


Figura 23. Flujo de correcciones de imágenes Landsat 8 y Terra, desde los Niveles Digitales (ND) a la Temperatura Superficial Terrestre. (Fuente: Elaboración propia)

4.2.1. Corrección geométrica

Para este trabajo, como se ha expuesto anteriormente, se utilizarán imágenes que provienen de distintos sensores y satélites, por lo que tienen diferentes sistemas de referencia, proyección cartográfica e incluso diferente resolución espacial.

Tabla 4. Comparativa del sistema de referencia, proyección cartográfica y resolución espacial entre los sensores de Landsat 8 y MODIS. (Fuente: Elaboración propia)

| | Sistema de referencia | Proyección cartográfica | Resolución espacial |
|------------------------|-----------------------|--------------------------------------|---------------------|
| Landsat 8 (OLI y TIRS) | WGS 84 | Universal Transversal Mercator (UTM) | 30m |
| MODIS | WGS 84 | Sinusoidal (SIN) | 1000m |

¹ TOA: Top Of Atmosphere

4. Cálculo de la temperatura superficial terrestre mediante imágenes de satélite

Paula de Andrés Anaya

La resolución final y la proyección con la que se trabajará será la misma que para las imágenes de Landsat 8, por lo que el objetivo es realizar un cambio de resolución y proyección a la imagen de MODIS, es decir, se creará una nueva imagen que conserve los valores radiométricos originales, pero aplicando una deformación para adaptarla a un sistema geodésico de referencia y una proyección cartográfica determinadas [9].

En este caso se deberá cambiar la resolución espacial de MODIS, pasar del kilómetro a los treinta metros, y su proyección cartográfica, de proyección sinusoidal a proyección UTM².

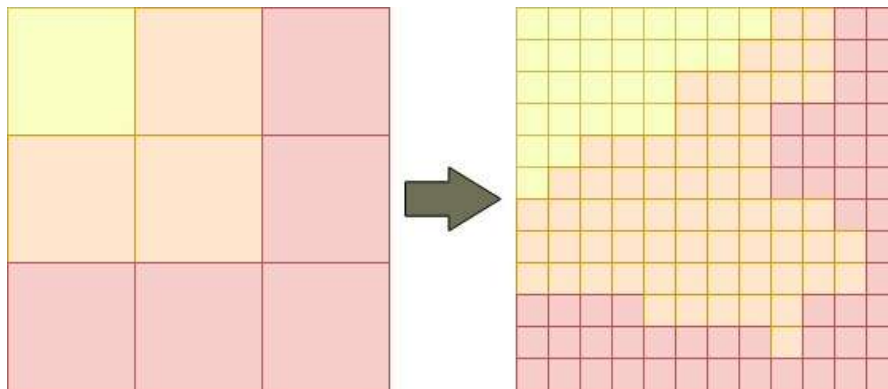


Figura 24. Ejemplo de cambio de resolución. (Fuente: Elaboración propia)

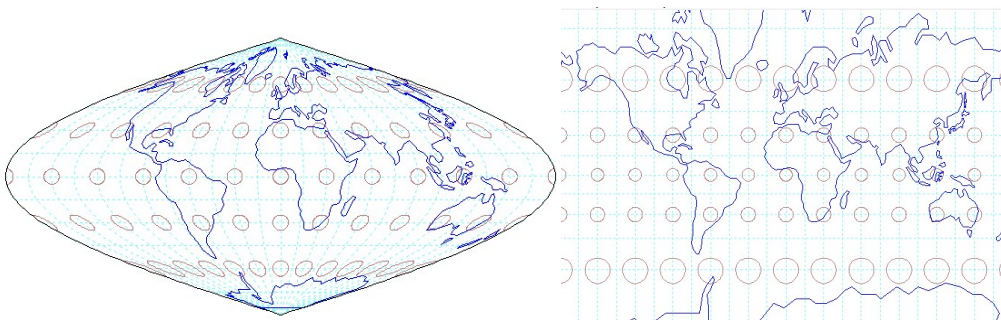


Figura 25. Diferencia entre proyección sinusoidal (izquierda) y proyección UTM (derecha). (Fuente: Software PJ_Japan)

La corrección geométrica que modifica la resolución espacial se conoce con el nombre de **remuestreo** o **resampling**, y para cambiar la proyección se hace un tipo de transformación geométrica denominada **reproyección**. Todas estas transformaciones pueden hacerse desde la página de descarga de LAADS DAAC (NASA), en el último apartado "Review & Order":

² UTM: Universal Transverse Mercator.

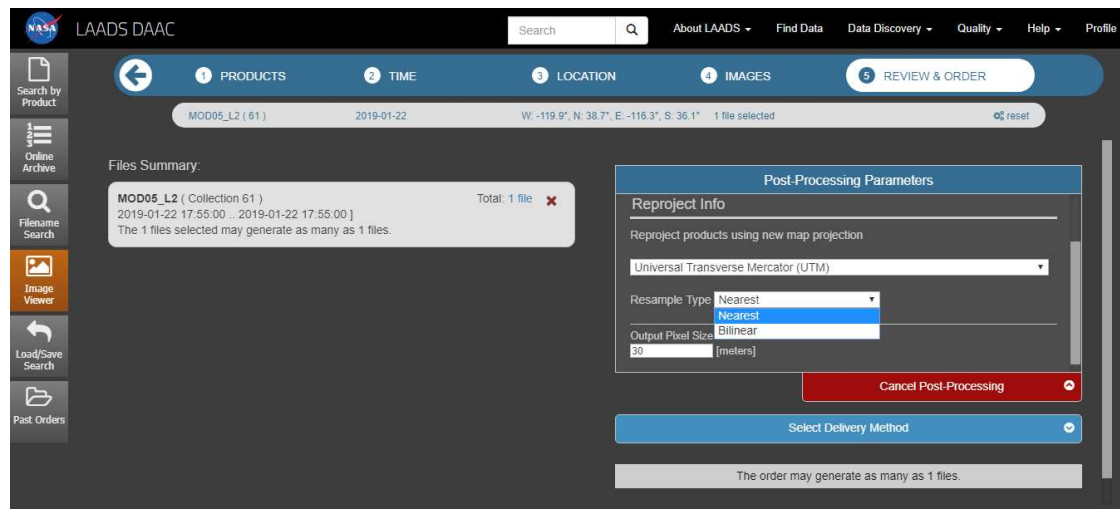


Figura 26. Web de descarga de imágenes MODIS; LAADS DAAC. Apartado "Review & Order". (Fuente: Elaboración propia)

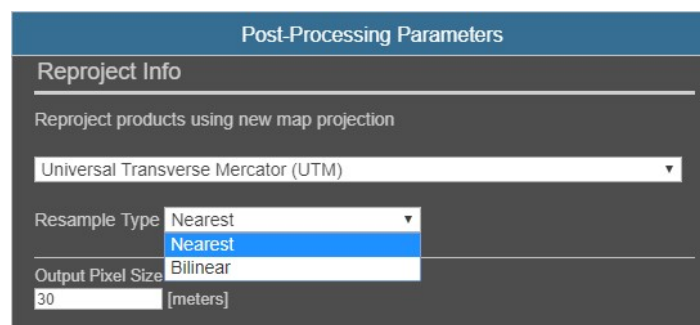


Figura 27. Métodos de remuestreo desde la web de descarga LAADS DAAC. (Fuente: Elaboración propia)

Para el remuestreo se ofrecen dos técnicas diferentes: **Vecino más cercano** (Nearest) y **Bilineal** (Bilinear).

- Para la técnica del vecino más cercano solo se tiene en cuenta un píxel, el más cercano al punto interpolado. Este método necesita muy poco tiempo de procesado, es el método más rápido.
- Para la técnica bilineal se tienen en cuenta los valores de píxeles conocidos que rodean al píxel en una vecindad de 2x2 píxeles más cercanos, es decir, de los cuatro centros de celdas más cercanos. Se toma el promedio ponderado de estos cuatro píxeles y se calcula el valor interpolado. El resultado es más suave que el método anterior, pero cuenta con la desventaja de que necesita más tiempo de procesado.

4. Cálculo de la temperatura superficial terrestre mediante imágenes de satélite

Paula de Andrés Anaya

Ambas técnicas serán aceptables para su futuro uso en el cálculo de la temperatura superficial terrestre, pero en el caso de este trabajo se ha utilizado la técnica bilineal.

4.2.2. Corrección del espectro óptico

Corrección radiométrica: Radiancia TOA

En el caso de los datos de Landsat 8, estos están derivados en 16 bits en formato no cifrado y pueden ser reescalados a los valores de radiancia en el techo de la atmósfera (Top - Of - Atmosphere, TOA), usando para ello los coeficientes radiométricos incluidos en el archivo de metadatos [26].

```
GROUP = RADIOMETRIC_RESCALING
RADIANCE_MULT_BAND_1 = 1.2174E-02    RADIANCE_ADD_BAND_1 = -60.86863
RADIANCE_MULT_BAND_2 = 1.2466E-02    RADIANCE_ADD_BAND_2 = -62.33022
RADIANCE_MULT_BAND_3 = 1.1487E-02    RADIANCE_ADD_BAND_3 = -57.43677
RADIANCE_MULT_BAND_4 = 9.6868E-03    RADIANCE_ADD_BAND_4 = -48.43392
RADIANCE_MULT_BAND_5 = 5.9278E-03    RADIANCE_ADD_BAND_5 = -29.63914
RADIANCE_MULT_BAND_6 = 1.4742E-03    RADIANCE_ADD_BAND_6 = -7.37098
RADIANCE_MULT_BAND_7 = 4.9688E-04    RADIANCE_ADD_BAND_7 = -2.48442
RADIANCE_MULT_BAND_8 = 1.0963E-02    RADIANCE_ADD_BAND_8 = -54.81386
RADIANCE_MULT_BAND_9 = 2.3167E-03    RADIANCE_ADD_BAND_9 = -11.58365
RADIANCE_MULT_BAND_10 = 3.3420E-04   RADIANCE_ADD_BAND_10 = 0.10000
RADIANCE_MULT_BAND_11 = 3.3420E-04   RADIANCE_ADD_BAND_11 = 0.10000
```

Figura 28. Coeficientes de calibración en los metadatos de una imagen de Landsat 8. (Fuente: Elaboración propia)

La ecuación empleada es la siguiente:

$$L_{\lambda} = M_L \cdot Q_{cal} + A_L$$

Siendo:

L_{λ} : la radiancia espectral obtenida por el sensor. Se mide en $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$.

Q_{cal} : producto estándar cuantificado y calibrado por valores de píxel (DN). Este valor se refiere a cada píxel en una de las bandas.

M_L : el factor multiplicativo de reescalamiento específico de cada banda. En los metadatos de Landsat 8 viene representado con el nombre $RADIANCE_MULT_BAND_{\lambda}$.

A_L : el factor aditivo de reescalamiento específico de cada banda. En los metadatos de Landsat 8 viene representado con el nombre $RADIANCE_ADD_BAND_{\lambda}$.

Otro método para obtener la radiancia es la siguiente:

$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{MAX\lambda} - L_{MIN\lambda}}{Q_{cal_MAX} - Q_{cal_MIN}} \right) (Q_{cal} - Q_{cal_MIN}) + L_{MIN\lambda}$$

Siendo:

QcalMIN y QcalMAX: los niveles digitales mínimos y máximos. Normalmente son 1 y 65535 para Landsat 8. En los metadatos de Landsat 8 vienen representado con los nombres QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_λ y QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_λ, respectivamente.

LMIN y LMAX: las radiancias espectrales en la banda λ correspondientes a QcalMIN y QcalMAX, respectivamente. En los metadatos de Landsat 8 vienen representado con los nombres REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_λ y REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_λ.

Ambas ecuaciones son válidas y aportan el mismo resultado, pero por su sencillez se aplicará la primera en este trabajo.

Corrección radiométrica: Reflectancia TOA

Es posible convertir imágenes con valores de radiancia a valores de reflectancia TOA, la cual combina la reflectancia de la superficie y la reflectancia atmosférica, para reducir la variabilidad inter-imagen a través de una normalización de la irradiancia solar. Esta reflectancia TOA, la cual es el ratio de la energía reflejada con respecto al total de la energía incidente (NASA, 2011) [8], puede ser calculada del siguiente modo:

$$p_{\lambda} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{ESUN_{\lambda} \cos(\theta_s)}$$

Siendo:

d distancia Tierra-Sol medida en unidades astronómicas. En los metadatos de Landsat 8 viene representado con el nombre EARTH_SUN_DISTANCE.

ESUNλ: irradiancia media solar exo-atmosférica de la banda λ:

$$ESUN_{\lambda} = \pi \cdot d^2 \frac{RADIANCE_MAXIMUM}{REFLECTANCE_MAXIMUM}$$

θs ángulo cenital solar en grados. Equivale a θs=90° - θe, siendo θe la elevación solar que viene indicada en los metadatos como SUN_ELEVATION.

Es importante indicar que para las imágenes de Landsat 8 se proveen factores de reescalamiento para cada banda que permiten la conversión directa de valores digitales DN a Reflectancia TOA.

4. Cálculo de la temperatura superficial terrestre mediante imágenes de satélite

Paula de Andrés Anaya

Corrección atmosférica: reflectancia de la superficie (Moran 1992)

Para pasar de reflectancia en el Techo de la Atmósfera (TOA) a reflectancia de la superficie hace falta una corrección atmosférica, esta elimina los efectos de dispersión y absorción de la atmósfera antes mencionados. Esta corrección atmosférica se aplica con el efecto bruma en la siguiente ecuación:

$$p = \frac{\pi \cdot (L_{\lambda} - L_p) \cdot d^2}{ESUN_{\lambda} \cos(\theta_s)}$$

Siendo:

L_p : es el efecto bruma (se le llama "bruma" a ese efecto azulado que produce la atmósfera sobre las imágenes).



Figura 29. Imágenes del satélite Landsat 8 de la zona de Ávila. A la izquierda imagen azulada con efectos atmosféricos a la derecha imagen corregida de efectos atmosféricos. (Fuente: Web Remotepixel)

$$L_p = L_{min} - L_{D01\%}$$

$$L_{min} = M_L \cdot DN_{min} + A_L$$

Existen diferentes métodos de corrección atmosférica, estos se pueden dividir en dos técnicas diferentes [10]:

- Técnicas basadas en la imagen: Entre ellas se encuentran los métodos DOS, COST y QUAC, entre otros.
- Técnicas basadas en el modelado de la atmósfera: Los más conocidos a día de hoy son el código 6S, LOWTRAN y MODTRAN.

En este trabajo se usará la técnica basada en imágenes más conocida en la actualidad, el método DOS. Dentro de este método se encuentran distintas metodologías, entre ellas:

DOS1, DOS2, DOS3 y DOS4 [11], cuyas diferencias pueden apreciarse en la Tabla 5. La fórmula general y sus variables son las siguientes:

$$L_{D01\%} = 0.01 \cdot [ESUN_{\lambda} \cdot \cos\theta_s \cdot T_z] + E_{down} \cdot \frac{T_v}{\pi \cdot d^2}$$

Siendo:

T_v : transmitancia de la atmósfera en la dirección de visión.

T_z : transmitancia atmosférica en la dirección de iluminación.

E_{down} : irradiancia difusa descendiente.

$ESUN_{\lambda}$: irradiancia media solar exo-atmosférica.

θ_s : ángulo zenital solar en grados.

d : distancia Tierra-Sol medida en unidades astronómicas. EARTH_SUN_DISTANCE.

Tabla 5. Métodos de corrección atmosférica basada en la imagen. (Fuente: Elaboración propia)

| | T_v | T_z | E_{down} |
|------|------------------------------|------------------------------|---------------|
| DOS1 | 1 | 1 | 0 |
| DOS2 | 1 | $\cos\theta_z$ | 0 |
| DOS3 | $e^{-\tau r / \cos\theta_v}$ | $e^{-\tau r / \cos\theta_z}$ | Rayleigh (6S) |
| DOS4 | $e^{-\tau / \cos\theta_v}$ | $e^{-\tau r / \cos\theta_z}$ | πL_p |

Para las metodologías DOS3 y DOS4 se sustituye los valores de T_v y T_z con las siguientes fórmulas:

$$\tau r = 0.008569\lambda^{-4}(1 + 0.0113\lambda^{-2} + 0.00013\lambda^{-4})$$

$$T_z = e^{-\tau / \cos\theta_v} = 1 - \frac{4\pi L_p}{E_o \cos\theta_z}$$

$$\tau = -\cos\theta_z \cdot \ln \left(1 - \frac{4\pi [M_L \cdot DN_{min} + A_L - 0.01(E_o \cdot \cos\theta_z \cdot T_z + E_{down}) \cdot T_v / \pi]}{E_o \cdot \cos\theta_z} \right)$$

Finalmente, el método utilizado es el DOS1, tanto por su sencillez como por la cantidad de estudios en los que se ha utilizado debido a sus resultados favorables. La fórmula del efecto bruma queda por lo tanto del siguiente modo:

$$L_p = M_L \cdot DN_{min} + A_L - 0.01 \cdot ESUN_{\lambda} \cdot \frac{\cos\theta_s}{\pi \cdot d^2}$$

4. Cálculo de la temperatura superficial terrestre mediante imágenes de satélite

Paula de Andrés Anaya

Para usar la corrección DOS en imágenes recortadas primero se debe hacer la corrección en la imagen original y después recortarla (Chávez 1988-1996), de no ser así el valor de DNmin sería erróneo. Dicho valor se calcula de la siguiente forma:

1. Se calcula el número total de píxeles de la imagen, pero sin contar los bordes negros sin información.

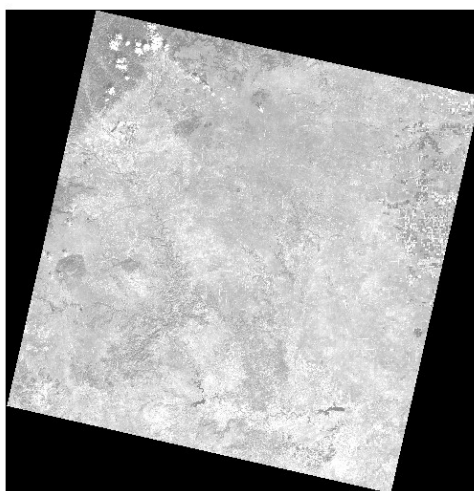


Figura 30. Ejemplo de imagen del satélite Landsat 8. Los bordes de la imagen muestran un marco negro para indicar los píxeles sin datos, estos son los que deben quedar fuera del cálculo del número total de píxeles. (Fuente: descarga desde la web Remotepixel)

2. Calcular la posición 0.01% (0.0001) y redondear al entero, por ejemplo; si tenemos 168000 píxeles;

$$168000 \cdot 0.0001 = 16.8$$

La posición del 0.01% es 16.8, si redondeamos al entero nos quedamos con la posición 17^a.

3. Ordenando de menor a mayor todos los valores digitales, se saca el valor digital en esa posición. Ese será el valor para DNmin.

4.2.3. Corrección del espectro térmico

El espectro térmico ha sido el menos utilizados a lo largo del tiempo, en comparación con otros datos como los del visible o infrarrojo cercano. Sin embargo, la teledetección térmica tiene un papel importante en la comprensión de los procesos que tienen lugar en la superficie terrestre, así como en las interacciones entre la superficie y la atmósfera.

Las principales variables a obtener son la **temperatura** y la **emisividad** de la superficie terrestre. La emisividad es una magnitud espectral, por lo que depende de la longitud de onda o banda del sensor, mientras que la temperatura no es una magnitud espectral por lo que su valor es independiente de la banda del sensor.

Corrección radiométrica: radiancia TOA y reflectancia TOA

Al igual que en el espectro óptico, el espectro térmico también se debe corregir de forma radiométrica. Las fórmulas serán las mismas, tanto para la radiancia TOA como para la reflectancia TOA:

$$L_{\lambda} = M_L \cdot Q_{cal} + A_L$$

$$L_p = M_L \cdot DN_{min} + A_L - 0.01 \cdot ESUN_{\lambda} \cdot \frac{\cos \theta_s}{\pi \cdot d^2}$$

Corrección radiométrica: temperatura de brillo en el satélite (Tb)

Las bandas térmicas, son las únicas que pueden pasar de radiancia espectral a temperatura de brillo mediante la inversión de la ecuación de Planck. Una de las tres leyes básicas de la radiación es la ley de Planck, esta proporciona una expresión para la distribución espectral de la radiancia emitida por un cuerpo negro a partir de su temperatura y viene dada por la siguiente expresión:

$$B_i(T_s) = \frac{2hc^2}{\lambda_i^5 \cdot \left(e^{\frac{hc}{\lambda_i k T_s}} - 1 \right)}$$

Siendo:

h: constante de Planck. $h=6.6261 \times 10^{-34}$ J·s

c: la velocidad de propagación de la luz en el vacío. $c=2.9979 \cdot 10^8$ m/s

λ : la longitud de onda de la banda "i"

k: constante de Boltzman $k=1.3806 \times 10^{-23}$ J/K

Es una ley fundamental ya que de forma inversa permite obtener la temperatura de un cuerpo a partir de la medida de su radiancia espectral. De este modo, haciendo la inversa de la ecuación se saca la ecuación de temperatura de brillo en el satélite.

$$T_b = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)}$$

Siendo:

T_b: temperatura de brillo en el sensor, se mide en Kelvin (K).

K₁: constante de conversión 1, se mide en W·m²·sr⁻¹·μm⁻¹. En los metadatos de Landsat 8, para la banda 10, esta constante térmica viene representado con el nombre K1_CONSTANT_BAND_10 y su valor es de 774.8853 W·m²·sr⁻¹·μm⁻¹.

K₂: constante de conversión 2, se mide en K. En los metadatos de Landsat 8, para la banda 10, esta constante térmica viene representado con el nombre K2_CONSTANT_BAND_10 y su valor es de 1321.0789 K.

Cabe destacar que los valores de K₁ y K₂ varían en función de la banda térmica del satélite (Tabla 6).

Tabla 6. Comparativa de los valores de constantes de conversión (K₁ y K₂) para distintos sensores térmicos de Landsat (Figura 14). (Fuente: Elaboración propia)

| | K1 | | K2 | |
|---------|------------------|----------|-------------------|----------|
| L7 ETM+ | 666.09 (Banda 6) | | 1282.71 (Banda 6) | |
| L8 TIRS | 774.89 | 480.89 | 1321.08 | 1201.14 |
| | Banda 10 | Banda 11 | Banda 10 | Banda 11 |

Corrección de emisividad

La emisividad de la superficie del suelo (ESS) es sin duda uno de los parámetros más complicados de obtener, y aparte de ser necesaria para calcular la temperatura con suficiente precisión, también aporta información muy valiosa en estudios geológicos para la identificación de minerales, además de ser también un identificador de cambios producidos en la superficie terrestre [22]. La emisividad es una propiedad intrínseca de los materiales que varía fundamentalmente de la composición, rugosidad y el contenido en humedad de la superficie, además, varía con las condiciones de observación, como la longitud de onda, la resolución del píxel y el ángulo de observación [7].

La emisividad puede estimarse a partir de medidas in situ, con el método de la caja de emisividad o mediante radiómetros multiespectrales con el método TES (expuesto a continuación). Todos los métodos in situ tienen el mismo inconveniente, solo se pueden

sacar medidas de una muestra aislada. Otra opción para obtener "muestras aisladas" sería usando bibliotecas multiespectrales.

Para calcular la emisividad de la superficie desde el espacio existen diferentes métodos [29]:

- Métodos de separación multicanal de la emisividad y temperatura (Multi-Chanel TES methods) o método de recuperación simultánea: el algoritmo TES se propuso por Gillespie et al. en el año 1998, fue desarrollado para aplicarlo en datos ASTER. El método es válido solo para aquellos sensores que disponen de al menos tres bandas en el IRT, ya que de otro modo se produciría el conocido problema de separación de temperatura y emisividad (Gillespie et al. 1998), ya que se tendrían más incógnitas que ecuaciones. Este método proporciona de manera simultánea la emisividad y la temperatura superficial. El algoritmo está compuesto por tres módulos; en el primero se obtiene una primera estimación de la emisividad a través de un proceso iterativo, en el segundo se normaliza el espectro de emisividad para minimizar la incertidumbre de la estimación y en el último se aplica una relación entre la emisividad mínima y el contraste espectral a partir de una relación empírica. Este método destaca por la capacidad para estimar la emisividad de cada banda y la temperatura superficial, sin ser necesaria una estimación previa de la emisividad de la superficie. Este método es usado en la actualidad por la NASA para calcular los productos MODIS de temperatura y emisividad (MOD21 es el producto de MODIS que aporta temperatura superficial).
- Métodos semi-empíricos: método alternativo que utiliza las relaciones de índices de vegetación o las medidas de reflectancia en el espectro solar. El método más representativo es el método de umbrales de NDVI creado por Van De Griend y Owe en 1993 [34]. Años después se publicaron otros métodos relacionados, como los de Valor y Caselles en 1996 [35], Sobrino y Raissouni en 2000 [36] o Tang y Li en 2014 [19].
- Métodos basados en ecuaciones físicas: estos métodos asumen los efectos atmosféricos de las radiancias medidas por el sensor y las corrige posteriormente para convertirlas en radiancias de superficie. Entre los métodos se encuentran los basados en el método TISI, los basados en métodos operacionales día/noche y los basados en la recuperación paso a paso.

4. Cálculo de la temperatura superficial terrestre mediante imágenes de satélite

Paula de Andrés Anaya

Para este trabajo se ha elegido uno de los métodos semi-empíricos por su sencillez y por el hecho de trabajar con un satélite que no cuentan con más de dos bandas térmicas, además una de ellas, la banda 11 de Landsat 8, desaconsejable por muchos estudios.

Tal y como indica Sobrino [12] se han seguido los siguientes pasos para obtener la emisividad de la banda térmica:

$$\varepsilon = m \cdot P_v + n$$

Siendo:

$$m = \varepsilon_v - \varepsilon_s - (1 - \varepsilon_s) \cdot F \cdot \varepsilon_v$$

$$n = \varepsilon_s + (1 - \varepsilon_s) \cdot F \cdot \varepsilon_v$$

$$F = 0.55$$

F: factor geométrico de la superficie. Varía entre 0 y 1, pero normalmente se le asigna el valor de 0.55.

Tal y como se dijo al comienzo, la emisividad varía fundamentalmente en función de su composición y rugosidad, por lo que aparece un gran inconveniente para este trabajo ya que se estudian áreas globales, es decir, se abarcan superficies muy diferentes; desde zonas montañosas y boscosas hasta llanuras desérticas. Dentro de la emisividad de vegetación habrá muchos valores (trigo, abetos, césped...) al igual que en la emisividad de suelos (asfalto, tierra...) por lo que los valores de ε_v (emisividad de vegetación) y ε_s (emisividad de suelo) deberán tener valores demasiado generalizados. Para este trabajo se usarán los valores propuesto por Xiaolei Xu et al. [18] estos han sido obtenidos tras comparar y hacer una media de los diferentes valores de emisividad sacados de la librería espectral MODIS UCSB (University of California, Santa Barbara).

Tabla 7. Comparativa de valores de emisividad (de suelo y vegetación) para las distintas bandas térmicas de Landsat 8. (Fuente: Elaboración propia)

| | ε_s (Suelo) | ε_v (Vegetación) |
|----------|-------------------------|------------------------------|
| Banda 10 | 0.9668 | 0.9863 |
| Banda 11 | 0.9747 | 0.9896 |

Al despejar estos valores de la ecuación anterior se obtiene:

$$m_{10} = 0.9863 - 0.9668 - (1 - 0.9668) \cdot 0.55 \cdot 0.9863 = 0.0015$$

$$n_{10} = 0.9668 + (1 - 0.9668) \cdot 0.55 \cdot 0.9863 = 0.9848$$

$$\varepsilon_{10} = 0.0015 \cdot Pv + 0.9848$$

$$\varepsilon_{11} = 0.0011 \cdot Pv + 0.9885$$

Pv es lo que se conoce como la proporción de vegetación, esta se obtiene tal y como indican Carlson y Ripley [27]:

$$Pv = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2$$

De forma generalizada se usan los valores de 0,2 y 0,5 para NDVI_{min} y NDVI_{max} respectivamente, pero para generalizar el caso de estudio se usará el valor real de NDVI mínimo y NDVI máximo.

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es el índice de vegetación más utilizado en diferentes campos de estudio, es un índice bidimensional que monitorea e identifica las propiedades reflectivas de la vegetación en la región del espectro visible e infrarrojo cercano, es decir, identifica el índice de vegetación a partir de la reflectancia de las bandas del rojo e infrarrojo cercano. Este índice surgió por Rouse et al. en el año 1974 [28], quien identificó la vegetación con imágenes de satélite en diferentes condiciones de iluminación y observación de la Tierra.

$$NDVI = \frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R}$$

En Landsat 8 las bandas del rojo e infrarrojo cercano son las bandas 4 y 5 respectivamente, por lo que la ecuación quedaría:

$$NDVI = \frac{\rho_5 - \rho_4}{\rho_5 + \rho_4}$$

El NDVI toma valores en el rango de -1 a 1, donde toma las siguientes clasificaciones aproximadas dependiendo del valor:

Tabla 8. Valores de NDVI para diferentes superficies. (Fuente: Elaboración propia)

| | NDVI |
|---|----------|
| Agua, nieve o nubes | <0 |
| Suelo desnudo | 0.01-0.1 |
| Vegetación ligera | 0.1-0.2 |
| Vegetación mediana (arbustos, pastizales) | 0.2-0.5 |
| Vegetación densa (bosques) | >0.6 |

4. Cálculo de la temperatura superficial terrestre mediante imágenes de satélite

Paula de Andrés Anaya

Con toda esta información podría estimarse la emisividad de la banda térmica. Se deja constancia de que existen numerosos medios de estudio por lo que esto será un aspecto a tener en cuenta en diferentes comparativas.

Corrección atmosférica: temperatura superficial terrestre

La radiación térmica que emite la Tierra y la que detecta el sensor son completamente diferentes, por ello hace falta aplicar una serie de correcciones.

La transferencia radiativa a lo largo de la atmósfera y el efecto que esta produce sobre la señal detectada por el sensor es el proceso que se conoce como **corrección atmosférica** y que representa uno de los mayores problemas en teledetección. A continuación, se detallará todo el proceso de corrección atmosférica y los distintos métodos de corrección que se usarán para este trabajo.

4.3. Corrección atmosférica en el espectro térmico: métodos existentes

La superficie terrestre se encuentra al alcance de cualquier ser humano, por lo que es de esperar que los métodos más conocidos y utilizados a lo largo de la historia para conocer la temperatura de la superficie terrestre sean los métodos in situ, en el momento y en el lugar en el que el usuario se encuentra. Estas medidas se realizaban, y realizan, con diferentes métodos o instrumentos:

- Mediante transectos térmicos para medidas a lo largo de un recorrido determinado [13].
- Mediante mástiles o torres en los que se sitúan diferentes instrumentos para medir puntos fijos.
- Por contacto mediante termómetros, pirgeómetros [4], termohigrómetros y termistores [13], cámaras térmicas...

Para este trabajo las medidas in situ no serán las utilizadas ya que lo que se pretende buscar es un método de estimación de temperatura mediante imágenes satelitales.

Para calcular la temperatura superficial terrestre a partir de imágenes de satélite existen dos metodologías diferentes, tal y como muestra la Figura 31: por una parte, existen los métodos que usan la emisividad previamente "conocida" o más bien aproximada y por otra parte, los métodos que desconocen la emisividad [14].

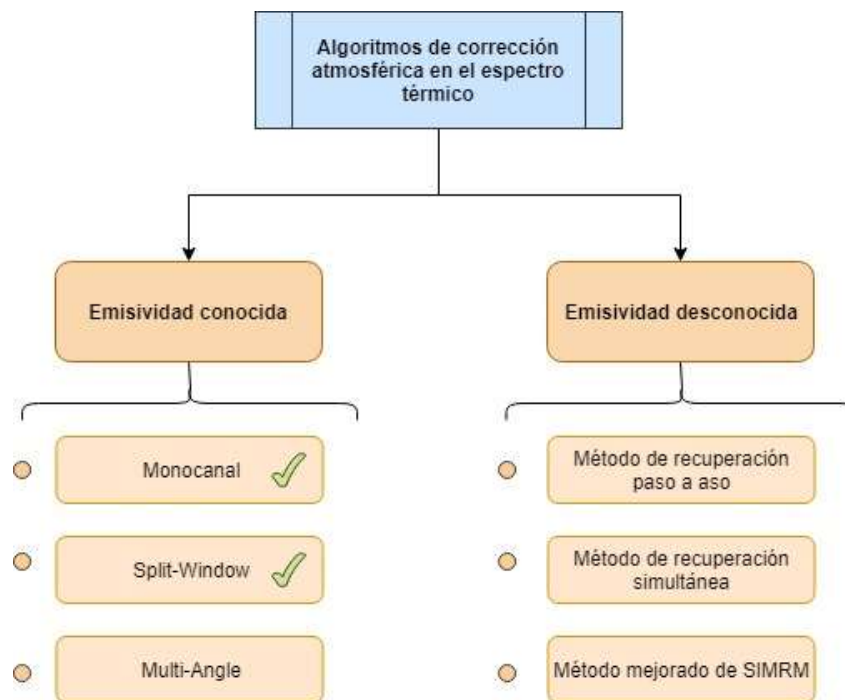


Figura 31. Diagrama de los distintos métodos para obtener la temperatura superficial terrestre a partir de imágenes de satélite. Los métodos marcados con un tic verde serán los desarrollados en este trabajo. (Fuente: Elaboración propia)

Este trabajo se centrará únicamente en aquellos métodos en los que se conoce la emisividad previamente (explicado en "Corrección de emisividad" en el apartado 4.2.3), y de manera más concreta en los métodos Monocanal y Split-Window.

Como se ha dicho en apartados anteriores, la temperatura superficial terrestre es una de las principales variables a obtener a partir del espectro térmico, y para obtener esta variable a partir de imágenes satelitales será necesario aplicar unas correcciones atmosféricas debido al paso de la radiación por la atmósfera.

La radiación emitida por la superficie debe atravesar la atmósfera antes de llegar a ser detectada por el sensor, por lo que habría que tener en cuenta todos los posibles procesos que sufre la radiación a su paso por la atmósfera ya que la radiación electromagnética, al atravesar un medio material, se ve atenuada por los procesos de **absorción** y **dispersión**, en el caso de la atmósfera "choca" con las moléculas y partículas que la componen [7]. En el caso del infrarrojo térmico debido a su longitud de onda predomina el fenómeno de absorción. Para poder recuperar la radiancia que proviene de la superficie a partir de la radiancia medida por el sensor, es necesario conocer la relación que existe entre ellas, y esta relación nos la ofrece la **ecuación de transferencia radiativa**, que es la base para realizar la corrección atmosférica y desarrollar los algoritmos de estimación de temperatura y emisividad. El proceso de dispersión es más dominante que el de absorción

4. Cálculo de la temperatura superficial terrestre mediante imágenes de satélite

Paula de Andrés Anaya

en dicha ecuación, y se divide en dos: dispersión de Rayleigh (por los gases atmosféricos) y dispersión de Mie (por los aerosoles). En el caso del infrarrojo térmico, la ecuación de transferencia radiativa viene dada por la siguiente expresión:

$$L_{\lambda}^{sen} = \tau_{\lambda} [\epsilon_{\lambda} B_{\lambda}(T_s) + (1 - \epsilon_{\lambda}) L_{atm \lambda}^{\downarrow}] + L_{atm \lambda}^{\uparrow}$$

Siendo:

L_{λ}^{sen} : la radiancia recibida por la banda i del sensor con temperatura de brillo T_b , es decir, T_b es la temperatura radiométrica medida al nivel del satélite.

$B_{\lambda}(T_s)$: la radiancia medida si la superficie fuera un cuerpo negro a la temperatura de la superficie T_s .

τ_{λ} : la transmisividad total de la atmósfera para la banda del canal λ del sensor.

ϵ_{λ} : la emisividad de la superficie.

$L_{atm \lambda}^{\downarrow}$: la radiancia atmosférica ascendente.

$L_{atm \lambda}^{\uparrow}$: es la radiancia atmosférica descendente.

Esta expresión puede obtenerse de forma intuitiva siguiendo el siguiente esquema:

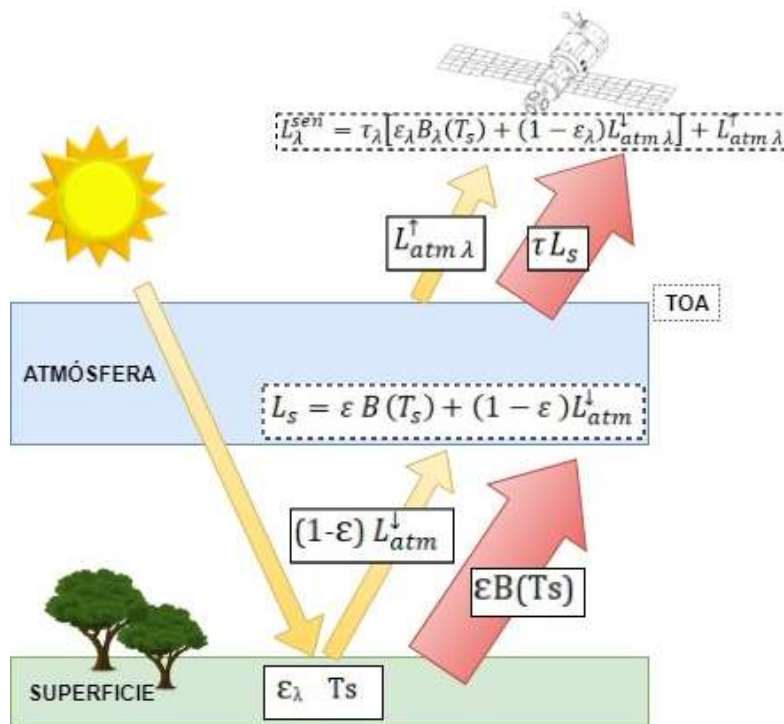


Figura 32. Esquema del recorrido de la radiación para la obtención de la ecuación de transferencia radiativa. (Fuente: Elaboración propia)

La superficie tiene una temperatura y una emisividad determinadas y emite según la ley de Planck corregida por el efecto de emisividad (término $\epsilon B(T_s)$), por otra parte, la propia atmósfera tiene una temperatura determinada y también emitirá radiación térmica, esta radiancia térmica (o atmosférica) puede emitirse en sentido ascendente o descendente ($L_{\text{atm}}^{\downarrow}$ y $L_{\text{atm}}^{\uparrow}$). La radiancia en sentido descendente incide en la superficie ($L_{\text{atm}}^{\downarrow}$) y es reflejada teniendo en cuenta la ley de Kirchhoff. Ley de Kirchhoff dice que, para una determinada longitud de onda, la absorptividad de la superficie es igual a la emisividad de la superficie a la misma temperatura. Esta ley es fundamental en radiometría ya que permite obtener la emisividad a partir de medidas de reflectividad. De ahí se explica el término $(1-\epsilon) L_{\text{atm}}^{\downarrow}$. Este último término de reflexión se suele agrupar con el de emisión de la superficie, para formar el término conocido como radiancia de la superficie (L_s). Esta radiancia debe atravesar la atmósfera antes de llegar al sensor. La absorción producida por la atmósfera viene caracterizada por la transmisividad atmosférica que nos indica el porcentaje de radiación que ha atravesado una determinada capa atmosférica, por tanto, la radiancia de la superficie que llega finalmente al sensor debe ser multiplicada por este factor (τ). El otro término radiativo medido por el sensor proviene de la propia emisión de la atmósfera, pero en este caso en sentido ascendente ($L_{\text{atm}}^{\uparrow}$).

Finalmente se puede escribir que la radiancia que emite el sensor viene dada por la radiancia de la superficie multiplicada por la transmisividad atmosférica más la propia radiancia atmosférica en sentido ascendente, de este modo se deduce la ecuación de transferencia radiativa (Figura 32) aplicada en la región del infrarrojo térmico.

Hay que tener en cuenta que si invertimos la ley de Planck para obtener temperatura a partir de la radiancia medida por el sensor obtendremos, como hemos dicho en apartados anteriores, lo que llamamos temperatura de brillo del satélite, sin embargo, esta temperatura no es la temperatura de la superficie terrestre, debido tanto al efecto atmosférico como a la propia corrección de emisividad.

El proceso de corrección atmosférica nos permite recuperar el término de la superficie a partir de la medida del sensor, en este caso podemos obtenerlo simplemente restando la contribución atmosférica ascendente de la radiancia medida por el sensor y corrigiendo por el factor de transmisividad. Hay que tener en cuenta que incluso realizando esta corrección el propio término de superficie sigue incluyendo un término atmosférico debido a la radiancia atmosférica descendente que se encuentra además acoplado con la

4. Cálculo de la temperatura superficial terrestre mediante imágenes de satélite

Paula de Andrés Anaya

emisividad de la superficie., por ello es de vital importancia encontrar los diferentes componentes atmosféricos que contribuyen a la absorción térmica.

El espectro de transmisividad atmosférica, en el rango de longitud de onda de la banda térmica, coincide en gran medida con el espectro del vapor de agua, excepto en la región de los 9,4 micrómetros que existe una fuerte absorción debida al ozono, y en la región de 13-14 micrómetros en la que existe una fuerte absorción debido al CO₂. Por tanto, salvo en esas excepciones, se puede decir que el principal componente que contribuye al efecto atmosférico en la región del infrarrojo térmico es el vapor de agua.

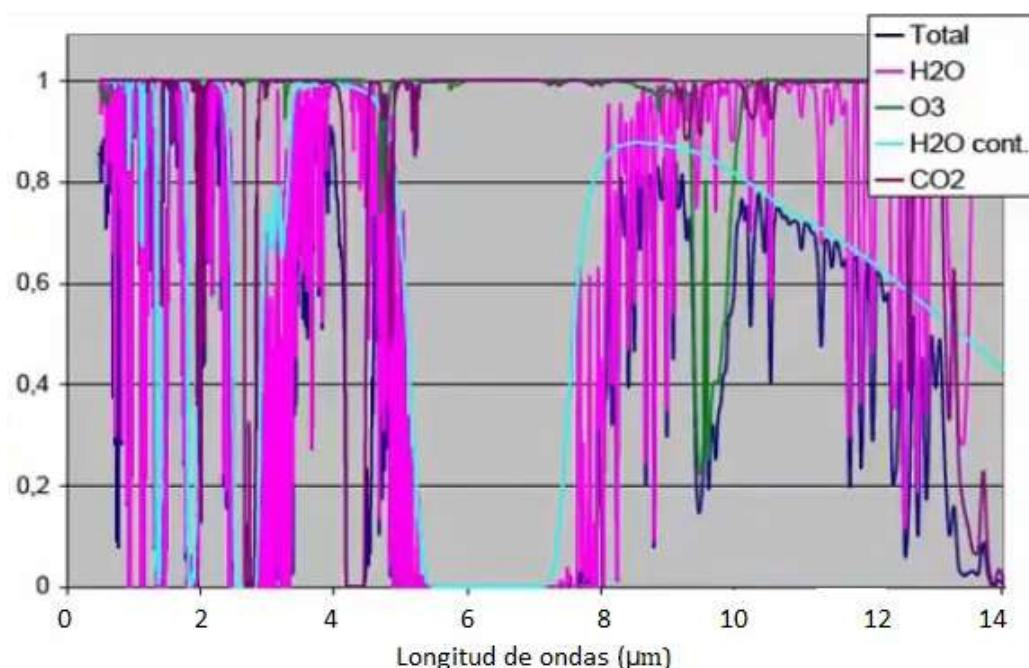


Figura 33. Gráfica de espectro de transmisividad atmosférica total y el espectro de transmisividad asociado a algunos componentes atmosféricos, como por ejemplo el vapor de agua. (Fuente: [22])

La transmisividad atmosférica variará en función de los distintos tipos de "atmósferas de referencia": atmósferas estándar de latitudes medias y subárticas (en verano e invierno) y atmósfera tropical. De estas cinco, la atmósfera tropical, al ser más húmeda y al tener un contenido en vapor de agua mayor, presenta los valores más bajos de transmisividad, mientras que la atmósfera subártica de invierno, la más seca, presenta los valores más altos de transmisividad.

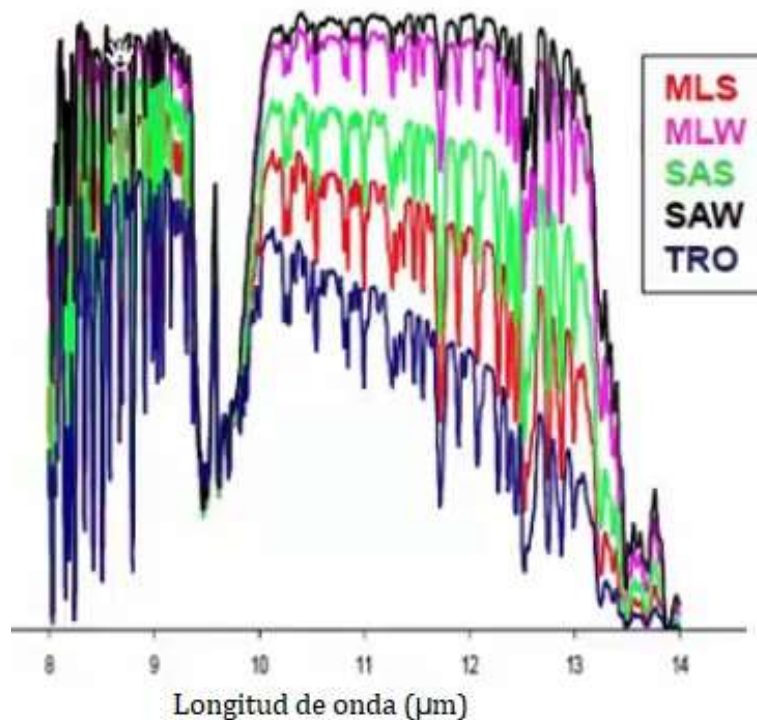


Figura 34. Gráfica de transmisividad atmosféricas para diferentes atmósferas de referencia: estándar a latitud media en verano (rojo) y en invierno (rosa), estándar a latitud subártica en verano (verde) y en invierno (negro), y tropical (azul). (Fuente: [22])

En estas gráficas se aprecian claramente las dos regiones de transmisividad altas separadas por la región de absorción del ozono. Estas regiones se conocen como ventanas atmosféricas y son las que se utilizan para la estimación de la temperatura y emisividad, especialmente la ventana de la región de 10-12 micrómetros.

Una vez vista la ecuación de transferencia radiativa y los componentes que contribuyen al efecto atmosférico, se puede pasar a profundizar en los métodos que se van a desarrollar para este trabajo; método Monocanal, Split-Window y simplificado, todos ellos son métodos que parten de la ecuación de transferencia radiativa.

4.3.1. Métodos Monocanal

Se consideran métodos Monocanal aquellos que usan una única banda térmica. En el caso del satélite Landsat 8 se usa la banda 10 ya que muchos estudios consideran que la banda 11 no es adecuada por sus problemas de calibración [15].

Dentro de los métodos Monocanal existen dos metodologías diferentes:

- Inversión directa de la ecuación de transferencia radiativa: conocidas la ecuación de transferencia radiativa y la ecuación de Planck, se despeja:

$$L_{\lambda}^{sen} = \tau_{\lambda} [\varepsilon_{\lambda} B_{\lambda}(T_s) + (1 - \varepsilon_{\lambda}) L_{atm \lambda}^{\downarrow}] + L_{atm \lambda}^{\uparrow}$$

$$B_i(T_s) = \frac{2hc^2}{\lambda_i^5 * \left(e^{\frac{hc}{\lambda_i k T_s}} - 1 \right)}$$

$$T_s = \frac{C_1}{\lambda_i \ln \left(\frac{C_2}{\lambda_i^5 \frac{B_i(T_i) - L_i^{\uparrow} - \tau_i(1 - \varepsilon_i)L_i^{\downarrow}}{\tau_i \varepsilon_i}} + 1 \right)}$$

Siendo:

λ : la longitud de onda de la banda "i"

ε_{λ} : la emisividad de la superficie.

c: la velocidad de propagación de la luz en el vacío. $c=2.9979 \cdot 10^8$ m/s

C1: la primera constante de radiación equivalente a $1.19104 \cdot 10^8$ W μ m/m²sr.

C2: la segunda constante de radiación equivalente a hc/k donde h es la constante de Planck y k la constante de Boltzman, o lo que es lo mismo $1.4388 \cdot 10^4$ μ mK.

En este caso se necesitaría conocer la emisividad de la superficie terrestre y los diferentes parámetros atmosféricos; transmisividad y radiancia atmosférica tanto ascendente como descendente. Estos parámetros pueden obtenerse a partir de perfiles atmosféricos y códigos de transferencia radiativa:

- Perfiles atmosféricos: radiosoundings, Reanalysis, Satellite sounders...
- Modelos de transferencia radiativa: MODTRAN, RTTOV, ATCOR...

Para Landsat existe una página de descarga, tanto de perfiles como directamente parámetros atmosféricos [<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>]. A continuación, se muestra un ejemplo:

| | | |
|---|--|---------|
| Año: 2019 | Mes: 1 | Día: 22 |
| Hora GMT: 14 | Minuto: 30 | |
| Latitud: 40.65137 <small>+ es el norte, - es el sur</small> | Longitud: -4.67917 <small>+ es este, - es oeste</small> | |
| <input type="radio"/> Utilice el perfil atmosférico para la <u>ayuda de</u> longitud / longitud del entero más cercano <input checked="" type="radio"/> Utilice el perfil atmosférico interpolado para una <u>ayuda</u> lat / long dada | | |
| <input type="radio"/> Utilice la atmósfera estándar de verano de latitudes medias para la <u>ayuda del</u> perfil atmosférico superior <input checked="" type="radio"/> Utilice la atmósfera estándar de invierno de latitudes medias para la <u>ayuda del</u> perfil atmosférico superior | | |
| <input checked="" type="radio"/> Utilice Landsat-8 TIRS Curva de respuesta espectral de banda 10 <input type="radio"/> Utilice la curva de respuesta espectral de la banda 6 de Landsat-7 <input type="radio"/> Utilice la curva de respuesta espectral Landsat-5 banda 6 <input type="radio"/> Salida solo perfil atmosférico, no calcular radiancias efectivas | | |
| Opcional: Condiciones de la superficie <small>(Si no ingresa las condiciones de la superficie, se usarán las condiciones de la superficie pronosticadas por el modelo. Si ingresa las condiciones de la superficie, se deben ingresar las cuatro condiciones).</small> | | |
| Altitud (km): | Presión (mb): | |
| Temperatura (C): | Humedad relativa (%): | |

Figura 35. Ejemplos de parámetros de entrada de la zona de la Escuela Politécnica Superior de Ávila para el 22/01/2019 sin introducir condiciones de superficie, para los que se desea calcular la transmisión atmosférica y la luminosidad. (Fuente: Elaboración propia)

Atmospheric Correction Parameter Calculator

Date (yyyy-mm-dd): 2019-01-22
 Input Lat/Long: 40.651/ -4.679
 GMT Time: 14:30
 L8 TIRS Band 10 Spectral Response Curve
 Mid-latitude winter standard atmosphere
 User input surface conditions
 Surface altitude (km): -999.000
 Surface pressure (mb): -999.000
 Surface temperature (C): -999.000
 Surface relative humidity (%): -999.000
 Band average atmospheric transmission: 0.88
 Effective bandpass upwelling radiance: 0.68 W/m²/sr/um
 Effective bandpass downwelling radiance: 1.15 W/m²/sr/um

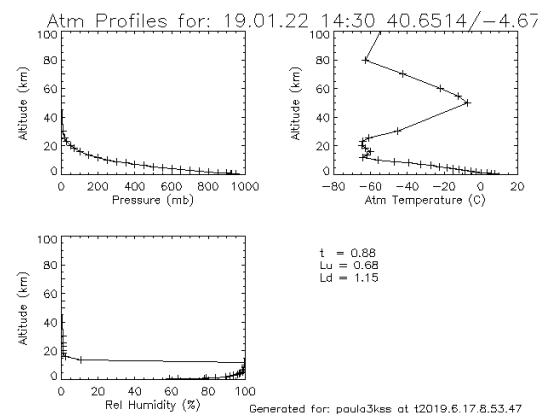


Figura 36. Resultados de los parámetros de corrección atmosférica para el ejemplo anterior. (Fuente: Elaboración propia)

Para el ejemplo anterior se obtendrían los valores $L\uparrow=0.68$, $L\downarrow=1.15$, y $\tau=0.88$

- **Algoritmo Monocanal generalizado:** Estos algoritmos se desarrollaron para simplificar la ecuación de transferencia radiativa. Se intenta evitar la dependencia de los perfiles atmosféricos por el hecho de que no siempre están disponibles o son demasiado complejos de adquirir, en su lugar se desarrollan algoritmos que usan otros parámetros atmosféricos como el vapor de agua o la temperatura del aire. El algoritmo original que tienen en común todos los métodos Monocanal fue desarrollado por Jiménez Muñoz y Sobrino en el año 2003 [16], y su fórmula es la siguiente.

$$Ts = \gamma[\varepsilon^{-1}(\psi_1 \cdot L_{sensor \lambda} + \psi_2) + \psi_3] + \delta$$

Siendo:

4. Cálculo de la temperatura superficial terrestre mediante imágenes de satélite

Paula de Andrés Anaya

γ y δ : parámetros obtenidos a partir de la función de Planck.

ψ_1 , ψ_2 y ψ_3 : las funciones atmosféricas.

ϵ : emisividad de la superficie.

$L_{\text{sensor}\lambda}$: radiancia del sensor para la banda térmica con longitud de onda λ

Para esta práctica se ha usado el algoritmo Monocanal generalizado. Existen muchos algoritmos Monocanal, pero para este trabajo se expondrán de manera detallada 2 de ellos a los que se les ha denominado: Monocanal 1 y Monocanal 2.

Monocanal 1

Este método se basa en un estudio de Jiménez Muñoz, Sobrino y otros, del año 2014 [5].

El esquema principal de trabajo es el siguiente:

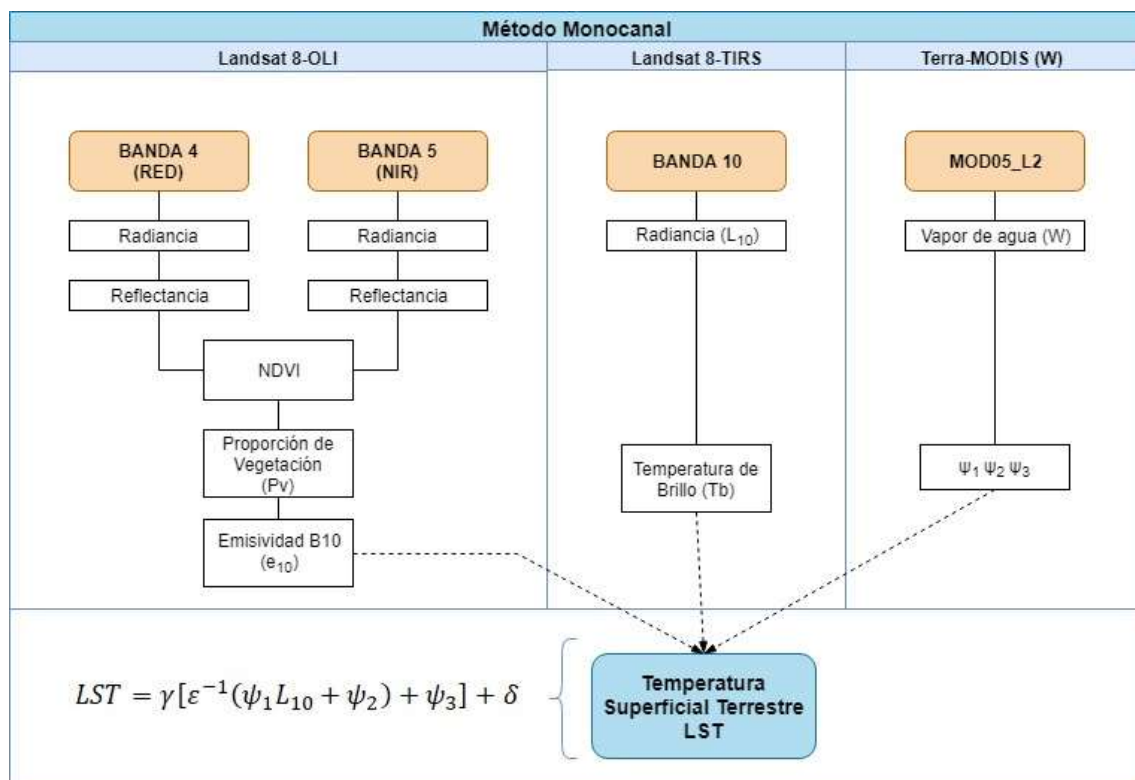


Figura 37. Esquema de trabajo del método Monocanal. (Fuente: Elaboración propia)

Para ejecutar este método se necesitan cuatro imágenes diferentes:

- Imagen de la banda 4, del sensor OLI, del satélite Landsat 8.
- Imagen de la banda 5, del sensor OLI, del satélite Landsat 8.
- Imagen de la banda 10, del sensor TIRS, del satélite Landsat 8.

- Imagen preprocesada de humedad del aire (W), del sensor MODIS, del satélite Terra.

Como se ha dicho en apartados anteriores el algoritmo principal que tienen en común todos los métodos Monocanal fue desarrollado por Jiménez Muñoz et al. en el año 2003 [16], y su fórmula es la siguiente:

$$Ts = \gamma[\varepsilon^{-1}(\psi_1 \cdot L_{sensor \lambda} + \psi_2) + \psi_3] + \delta$$

Siendo:

γ y δ : parámetros obtenidos a partir de la función de Planck.

$$\gamma = \left[\frac{C_2 \cdot L_{sensor \lambda}}{Tb_{sensor \lambda}^2} \left[\frac{\lambda^4}{C_1} L_{sensor \lambda} + \lambda^{-1} \right] \right]^{-1} \quad \delta = -\gamma \cdot L_{sensor \lambda} + Tb_{sensor \lambda}$$

ψ_1 , ψ_2 y ψ_3 : las funciones atmosféricas. Los valores de estas funciones son lo que diferencian un método Monocanal de otro. Para el método Monocanal 1 los valores se obtienen con un polinomio de segundo grado en el que se relaciona el contenido de vapor de agua, ya que como se ha indicado con anterioridad este es uno de los parámetros que más contribuyen al efecto atmosférico en la región del infrarrojo térmico.

$$\begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \psi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.04019 & 0.02916 & 1.01523 \\ -0.3833 & -1.50294 & 0.20324 \\ 0.00918 & 1.36072 & -0.27514 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W^2 \\ W \\ 1 \end{bmatrix}$$

Según Sobrino [5], los errores de temperatura superficial terrestre, para este método, se vuelven inaceptables para contenidos altos de vapor de agua (para contenidos mayores de 2,5 g/cm²). También indica que este problema puede resolverse incluyendo la temperatura del aire como entrada, tal y como hace en artículos posteriores [17].

Monocanal 2

El esquema de trabajo es el mismo que para el método Monocanal 1, por lo que se necesitarán las mismas imágenes.

4. Cálculo de la temperatura superficial terrestre mediante imágenes de satélite

Paula de Andrés Anaya

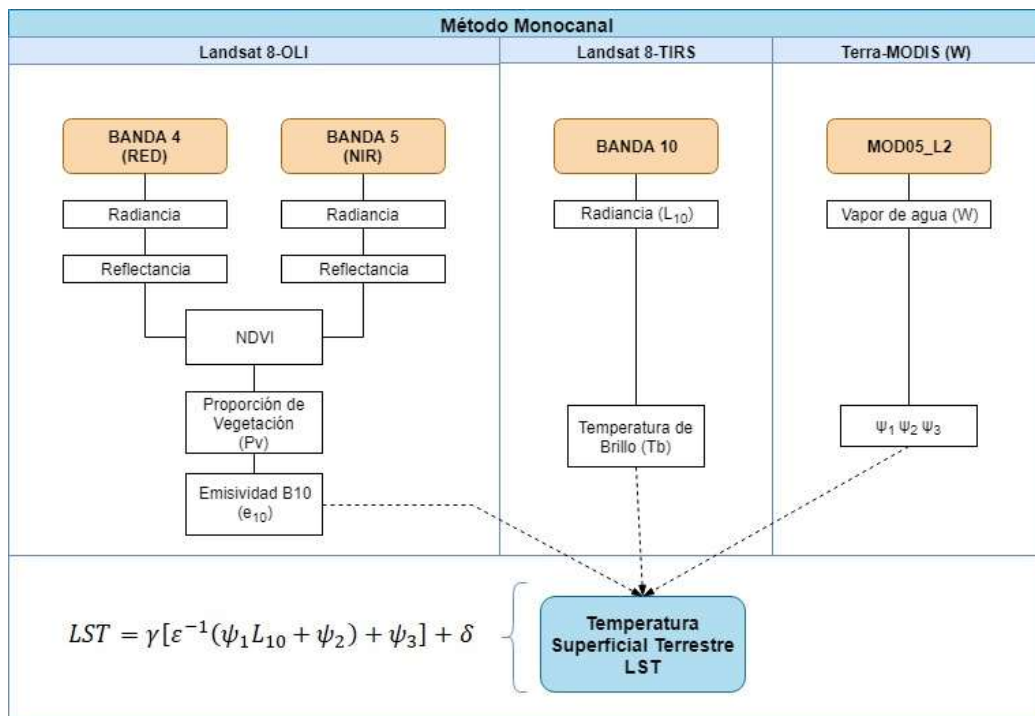


Figura 38. Esquema de trabajo del método Monocanal. (Fuente: Elaboración propia)

La diferencia se encuentra en que este método se basa en un estudio de Xiaolei Yu et al. del año 2014 [18] pero corregido para Landsat 8, aplicando el método original de Jiménez muñoz [16].

$$\psi_k = \eta_{k\lambda} W^3 + \xi_{k\lambda} W^2 + \chi_{k\lambda} W + \varphi_{k\lambda}$$

| AF | Spectral Functions |
|----------|--|
| ψ_1 | $\eta_{1\lambda} = 0.00090 \lambda^3 - 0.01638 \lambda^2 + 0.04745 \lambda + 0.27436$ $\xi_{1\lambda} = 0.00032 \lambda^3 - 0.06148 \lambda^2 + 1.2021 \lambda - 6.2051$ $\chi_{1\lambda} = 0.00986 \lambda^3 - 0.23672 \lambda^2 + 1.7133 \lambda - 3.2199$ $\varphi_{1\lambda} = -0.15431 \lambda^3 + 5.2757 \lambda^2 - 60.1170 \lambda + 229.3139$ |
| ψ_2 | $\eta_{2\lambda} = -0.02883 \lambda^3 + 0.87181 \lambda^2 - 8.82712 \lambda + 29.9092$ $\xi_{2\lambda} = 0.13515 \lambda^3 - 4.1171 \lambda^2 + 41.8295 \lambda - 142.2782$ $\chi_{2\lambda} = -0.22765 \lambda^3 + 6.8606 \lambda^2 - 69.2577 \lambda - 233.0722$ $\varphi_{2\lambda} = 0.41868 \lambda^3 - 14.3299 \lambda^2 + 163.6681 \lambda - 623.5300$ |
| ψ_3 | $\eta_{3\lambda} = 0.00182 \lambda^3 - 0.04519 \lambda^2 + 0.32652 \lambda - 0.60030$ $\xi_{3\lambda} = -0.00744 \lambda^3 + 0.11431 \lambda^2 + 0.17560 \lambda - 5.4588$ $\chi_{3\lambda} = -0.00269 \lambda^3 + 0.31395 \lambda^2 - 5.5916 \lambda + 27.9913$ $\varphi_{3\lambda} = -0.07972 \lambda^3 + 2.8396 \lambda^2 - 33.6843 \lambda + 132.9798$ |

Figura 39. Imagen de funciones espectrales para obtener los valores de las funciones atmosféricas a partir de la longitud de onda de la banda térmica utilizada.

Teniendo en cuenta que para el método Monocanal se usa la banda 10 de Landsat 8 y que su longitud de onda media es de $10,9 \mu\text{m}$ las funciones atmosféricas quedan definidas por:

$$\begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \psi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0099976 & 0.00966064 & 0.09347952 & 1.02178928 \\ -0.05327456 & -0.4880672 & -1.4640128 & 0.06216416 \\ -0.05216976 & 0.39854112 & 0.83252272 & -0.02393664 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W^3 \\ W^2 \\ W \\ 1 \end{bmatrix}$$

Según Xaolei Yu, la fuente de error más importante en el método Monocanal (de manera general, por lo que afecta al Monocanal 1 y al Monocanal 2) se debe a los efectos atmosféricos, lo que lleva a un error en la temperatura superficial entre 0.2 K y 0.7 K, y la incertidumbre de la emisividad de la superficie terrestre, que conduce a un error adicional en la temperatura superficial entre 0.2 K y 0.4 K.

4.3.2. Métodos Split-Window

Se consideran métodos Split-Window, o método de ventana dividida, aquellos que usan dos bandas térmica. En el caso del satélite Landsat 8 se usan las bandas 10 y 11.

La técnica Split-Window se basa en el concepto de absorción diferencial, esta se basa en que el efecto atmosférico puede caracterizarse a partir de la diferencia entre las radiancias o temperaturas medidas en dos bandas espectrales distintas. Basándose en este concepto se han desarrollado distintos algoritmos con distinta estructura matemática pero para este trabajo se expondrán de manera detallada dos de ellos a los que se ha denominado: Split-Window 1 y Split-Window 2.

Split-Window 1.

Este método se basa en el estudio desarrollado por Jiménez Muñoz et al. en el año 2014 [5], en el que se sigue el siguiente esquema de trabajo:

4. Cálculo de la temperatura superficial terrestre mediante imágenes de satélite

Paula de Andrés Anaya

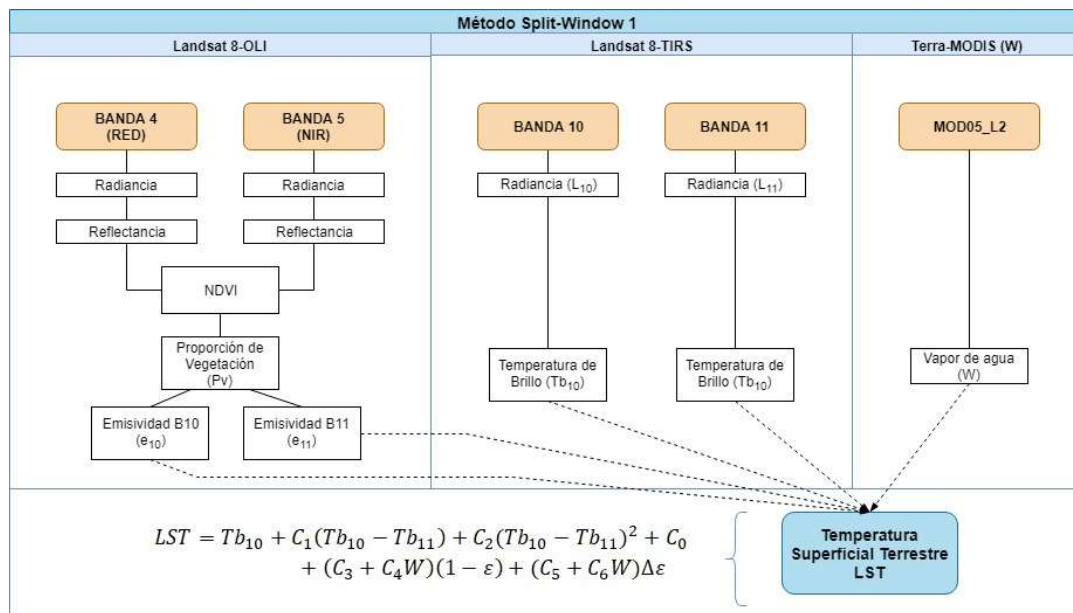


Figura 40. Esquema de trabajo del método Split-Window 1. (Fuente: Elaboración propia)

Para ejecutar este método se necesitan cinco imágenes diferentes, una imagen más que para los métodos Monocanal:

- Imagen de la banda 4, del sensor OLI, del satélite Landsat 8.
- Imagen de la banda 5, del sensor OLI, del satélite Landsat 8.
- Imagen de la banda 10, del sensor TIRS, del satélite Landsat 8.
- Imagen de la banda 11, del sensor TIRS, del satélite Landsat 8.
- Imagen preprocesada de humedad del aire (W), del sensor MODIS, del satélite Terra.

La ecuación que corresponde a este método es:

$$LST = Tb_{10} + C_1(Tb_{10} - Tb_{11}) + C_2(Tb_{10} - Tb_{11})^2 + C_0 + (C_3 + C_4W)(1 - \varepsilon) + (C_5 + C_6W)\Delta\varepsilon$$

Siendo:

Tb: la temperatura de brillo para cada una de las bandas térmicas.

W: el contenido de vapor de agua en la atmósfera.

ε: la emisividad media de ambas bandas térmicas, es decir; $\varepsilon = (\varepsilon_{10} + \varepsilon_{11})/2$

Δε: el sumatorio de la emisividad de ambas bandas térmicas, es decir; $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{10} + \varepsilon_{11}$

C0-C6: los coeficientes para el algoritmo Split-Window 1 (Tabla 9).

Tabla 9. Coeficientes Split-Window 1. (Fuente: Elaboración propia)

| Coeficientes | |
|--------------|---------|
| c0 | -0.268 |
| c1 | 1.378 |
| c2 | 0.183 |
| c3 | 54.30 |
| c4 | -2.238 |
| c5 | -129.20 |
| c6 | 16.40 |

La ventaja principal de este algoritmo Split-Window es que se desempeña bien en condiciones globales, es decir, con cualquier valor de vapor de agua. Pero como se ha dicho anteriormente, cuanta con la gran desventaja de que se debe usar la banda 11 de Landsat 8, y esta presenta errores en la calibración [15].

Split-Window 2

Este método se basa en el estudio desarrollado por Chen Du et al. en el año 2014 [19] el cual sigue el siguiente procedimiento:

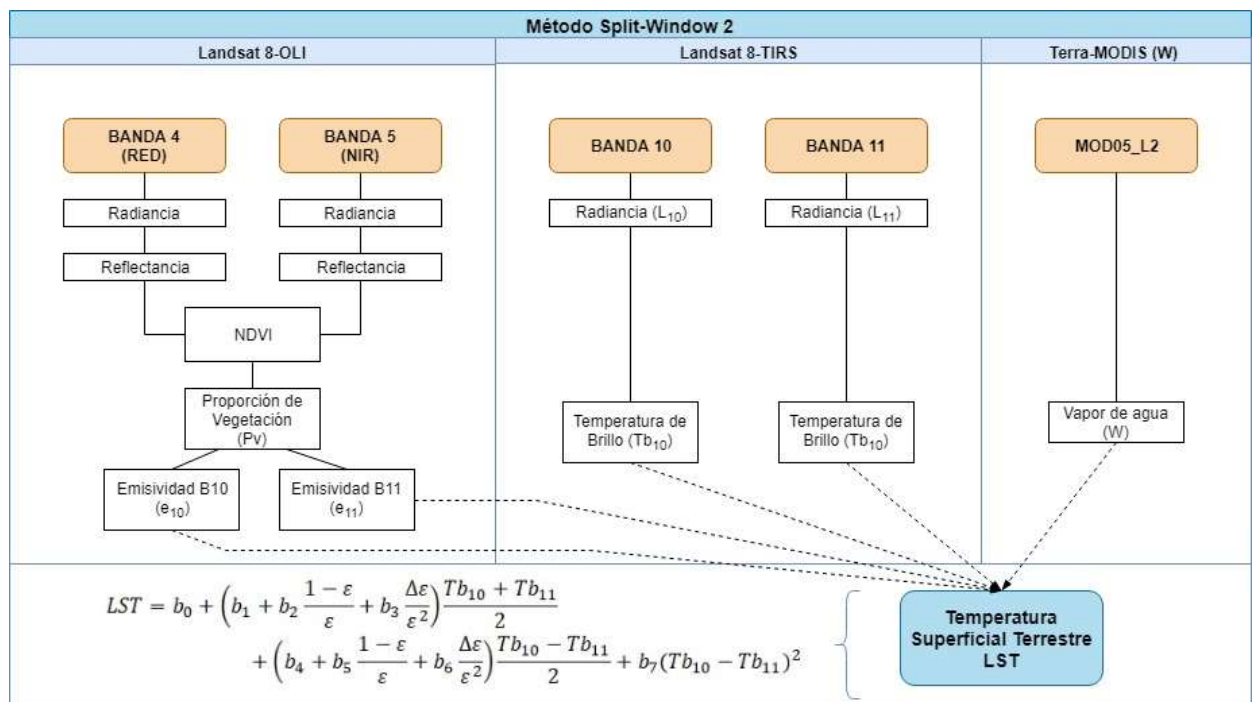


Figura 41. Esquema de trabajo del método Split-Window 2. (Fuente: Elaboración propia)

4. Cálculo de la temperatura superficial terrestre mediante imágenes de satélite

Paula de Andrés Anaya

El método es similar al Split-Window 1, por lo que usarán las mismas imágenes, en cambio la ecuación final y sus términos son diferentes:

$$LST = b_0 + \left(b_1 + b_2 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} + b_3 \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^2} \right) \frac{Tb_{10} + Tb_{11}}{2} + \left(b_4 + b_5 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} + b_6 \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^2} \right) \frac{Tb_{10} - Tb_{11}}{2} + b_7 (Tb_{10} - Tb_{11})^2$$

Siendo:

Tb: la temperatura de brillo para cada una de las bandas térmicas.

W: el contenido de vapor de agua en la atmósfera.

ε : la emisividad media de ambas bandas térmicas, es decir; $\varepsilon = (\varepsilon_{10} + \varepsilon_{11})/2$

$\Delta \varepsilon$: el sumatorio de la emisividad de ambas bandas térmicas, es decir; $\Delta \varepsilon = \varepsilon_{10} + \varepsilon_{11}$

b0-b11: los coeficientes para el algoritmo Split-Window 2, los cuales varían en función de W (Figura 42).

| WV range (g/cm ²) | b ₀ | b ₁ | b ₂ | b ₃ | b ₄ | b ₅ | b ₆ | b ₇ |
|----------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| All | -23.523 | 1.100 | 0.141 | -0.291 | 5.162 | -12.047 | -29.215 | 0.236 |
| <2.5 | -19.272 | 1.078 | 0.182 | -0.103 | 0.880 | 2.840 | 15.328 | -0.179 |
| 2.5~4.0 | -22.434 | 1.102 | 0.151 | -0.215 | 5.889 | 0.314 | -3.458 | -0.021 |
| 4.0~6.3 | -60.895 | 1.225 | 0.103 | -0.114 | 6.549 | 2.136 | -6.009 | 0.132 |

Figura 42. Coeficientes para el método Split-Window 2. (Fuente: [19])

El hecho de que estos coeficientes varíen en función de W tiene la finalidad de reducir la influencia del vapor de agua en el resultado final, aun así se llegó a la conclusión en el estudio de que los resultados más favorables se obtuvieron para aquellos casos en los que el vapor de agua era inferior a 2,5 g cm⁻².

4.3.3. Método simplificado

Este método se basa en el estudio desarrollado por Ugur Avdan y Gordana Jovanovska en el año 2016 [20].

Se le denomina método "simplificado" de manera extraoficial ya que no tiene un nombre específico y se caracteriza porque es el método más rápido y con menos pasos a seguir. Al

dejar fuera del cálculo factores como la humedad o temperatura del aire se puede afirmar que es el método más inexacto.

Este método sigue el siguiente esquema de trabajo:

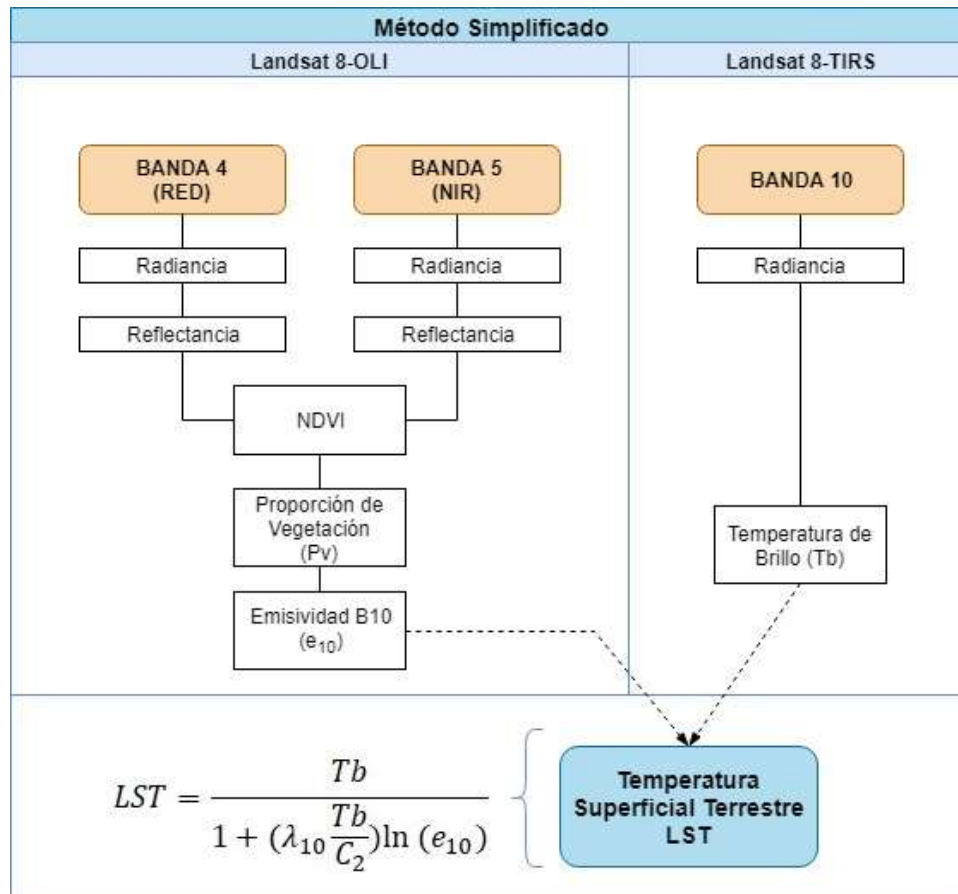


Figura 43. Esquema de trabajo del método simplificado. (Fuente: Elaboración propia)

Para este método se necesitan únicamente las imágenes de las bandas 4, 5 y 10 del satélite Landsat8. La ecuación final es la siguiente:

$$LST = \frac{Tb}{1 + (\lambda_{10} \frac{Tb}{C_2}) \ln(\epsilon_{10})}$$

Siendo:

Tb: la temperatura de brillo en el satélite en la banda 10 en K.

ϵ_{10} : la emisividad de la banda 10.

λ_{10} : la longitud de onda media de la banda 10 en metros (0.0000108 m).

C2: la segunda constante de radiación equivalente a $1.4388 \cdot 10^4 \mu\text{mK}$.

5. Evaluación de métodos y comparativas

Una vez expuestos desde un punto de vista teórico los métodos más recomendables para el cálculo de la temperatura superficial terrestre mediante imágenes de satélite, es necesario llevarlo a la práctica. Para ello, a lo largo de este apartado se procederá a la automatización de los procesos y la visualización de los resultandos haciendo un uso combinado de dos herramientas con un gran potencial: MATLAB como lenguaje de programación para la automatización de procesos y QGIS, como sistema de información geográfica para el tratamiento de datos geoespaciales. Gracias a dicha combinación se podrá proceder a la realización de una evaluación de los diferentes métodos mencionados en el apartado 4.3, tanto desde un punto de vista numérico como visual tomando como verdad-terreno los productos ofrecidos por la NASA denominados ARD: Analysis Ready Data.

5.1. MATLAB: lenguaje de programación para la automatización de cálculos

MATLAB es un software propietario de cálculo numérico, con vectores y matrices, que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio, conocido como lenguaje M.



La abreviatura MATLAB proviene de las palabras MATrix LABoratory [23], que significan "laboratorio de matrices", dos palabras que resumen en gran medida este programa ya que entre sus posibilidades de trabajo destaca la manipulación de matrices.

Este fue el motivo primordial de la elección de MATLAB como software principal de trabajo ya que cuenta con la gran característica de que trata las imágenes como matrices, es decir, cada píxel de la imagen corresponde con una celda de la matriz; con información específica y una posición determinada por el número de fila y la columna.

MATLAB cuenta con muchas otras prestaciones de gran utilidad para este trabajo, como la representación de datos, la implementación de algoritmos y la creación de interfaces de usuario (GUI, de la que se hablará en apartados posteriores).

5. Evaluación de métodos y comparativas

Paula de Andrés Anaya

Al ser un software de pago tiene la desventaja, para los usuarios, de necesitar una licencia de pago. En concreto para este trabajo, al tratarse de un proyecto universitario perteneciente a la Universidad de Salamanca se dispone de una licencia de estudiante gratuita, la cual se puede encontrar en la plataforma de Servicios Informáticos de la USAL.

El método idóneo para comprobar si los algoritmos de cálculo de temperatura superficial son adecuados y si sus resultados se parecen a la realidad, sería mediante la utilización de termómetros, termistores y pirgeómetros en el terreno, tal y como se ha hecho en algunas investigaciones [4]. Como estos métodos son demasiado costosos, se recurre a otros totalmente gratuitos y a disponibilidad de cualquier usuario. Entre ellos se encuentra una herramienta libre de QGIS que asegura y ayuda a comprobar parte de los pasos intermedios necesarios para calcular la temperatura superficial terrestre, y por otra parte una serie de imágenes de la NASA que ofrecen la temperatura superficial terrestre provisional.

5.2. Imágenes ARD: Landsat Analysis Ready Data

Tras una larga investigación y asumiendo la complejidad de la temperatura de la superficie en cada instante, se encontraron una serie de datos a los que se consideraron como verdad-terreno, estos fueron uno de los datos ARD.

Los datos ARD son un producto novedoso (publicado en 2018) creado por la NASA con el objetivo fundamental de reducir significativamente la cantidad de trabajos que se llevan a cabo para diferentes aplicaciones científicas, ya que en la actualidad se descargan y procesan grandes cantidades de datos relacionados con imágenes Landsat.

Las imágenes de Landsat Level-1 (entre las que se encuentran las imágenes de Landsat 8 que se utilizan en este trabajo) son las que sirven de base para generar los productos ARD, por eso, a pesar de ser un producto tan novedoso, cuenta con imágenes de fechas entre 1983 y la actualidad. Entre los productos de ARD se encuentran la reflectancia TOA, la temperatura de brillo en el satélite, la reflectancia de la superficie y la temperatura superficial terrestre provisional.

Los productos Landsat ARD solo están disponibles actualmente para los Estados Unidos continentales, Alaska y Hawái, por lo que si se quiere hacer una comparativa de resultados se tendrá que trabajar en estas zonas.

Las imágenes de Landsat ARD, para los Estados Unidos continentales y Hawái, se generan en la proyección cartográfica cónica de Albers Equal Area (AEA), utilizando como Datum el WGS84 (World Geodetic System 1984).

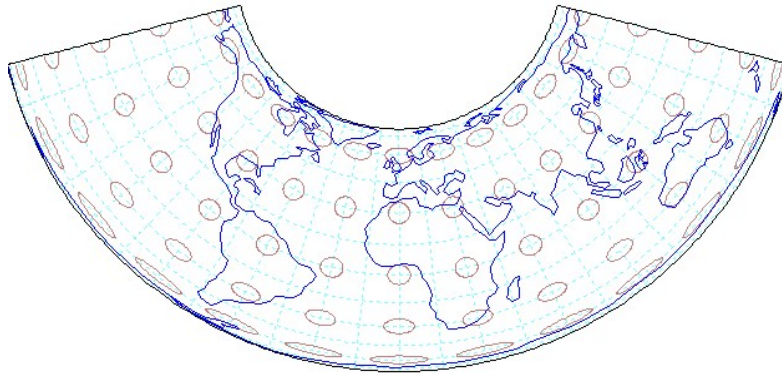


Figura 44. Proyección cartográfica cónica de Albers Equal Area (AEA) usada para los datos ARD.
(Fuente: Software PJ_Japan)

Cada imagen ARD tiene una resolución espacial de treinta metros, igual que los productos originales de Landsat 8, pero el tamaño de la imagen es más pequeño: Landsat ARD tiene 5000x5000 píxeles frente a los aproximadamente 6300x6000 píxeles de Landsat 8. Para cubrir los Estados Unidos continentales se usan unas 422 imágenes.

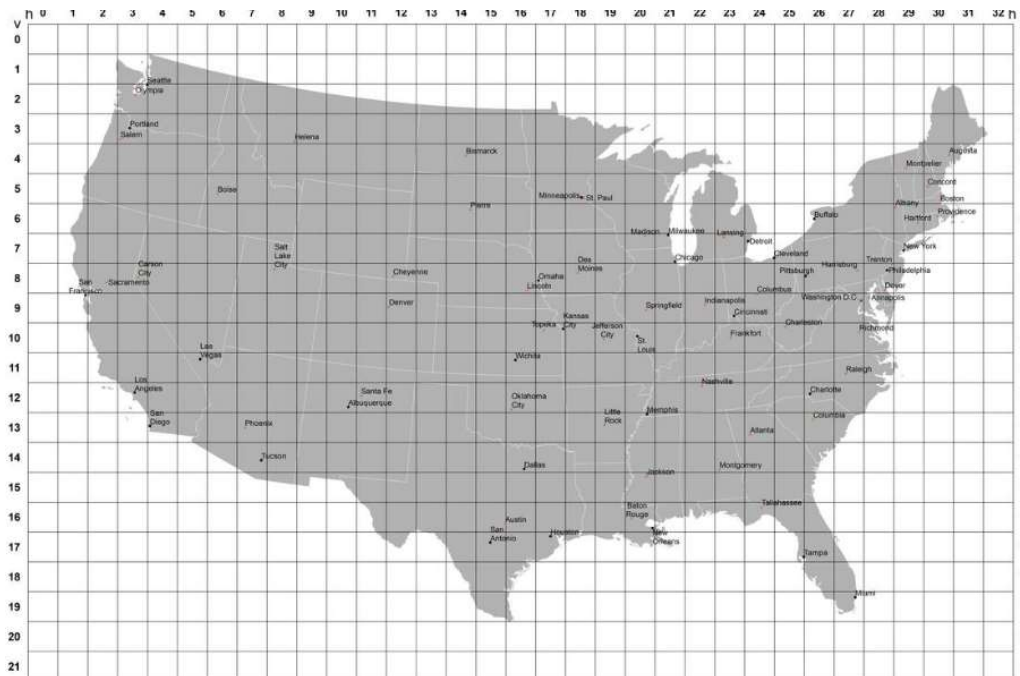


Figura 45. Rejilla de imágenes de ARD para Estados Unidos. (Fuente: [30])

La descarga de dichas imágenes puede llevarse a cabo a través de la Web de descarga EarthExplorer, con el formato de datos GeoTIFF. Entre los archivos a descargar se encuentran los siguientes:

5. Evaluación de métodos y comparativas

Paula de Andrés Anaya



Figura 46. Carpetas de descarga de datos ARD en earthexplorer. (Fuente: Elaboración propia)

La carpeta de archivos "Provisional Surface Temperature" es la que contiene el archivo necesario. Una vez descargado el archivo Zip, la imagen que se tomará como verdad terreno para la comprobación será aquella cuyo nombre finalice por "ST".

LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_ST.tar - archivo TAR, tamaño descomprimido 100,576,434 bytes

| Nombre | Tamaño | Comprimido | Tipo |
|--|------------|------------|---------------------|
| .. | | | Carpeta de archivos |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_URAD.tif | 7.746.398 | 7.746.398 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_TRAD.tif | 32.604.638 | 32.604.638 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_STQA.tif | 7.607.824 | 7.607.824 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_ST.tif | 16.004.988 | 16.004.988 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_RADSATQA.tif | 126.939 | 126.939 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_PIXELQA.tif | 374.465 | 374.465 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_LINEAGEQA.tif | 150.217 | 150.217 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_EMSD.tif | 5.944.048 | 5.944.048 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_EMIS.tif | 9.612.742 | 9.612.742 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_DRAD.tif | 9.025.144 | 9.025.144 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_CDIST.tif | 3.098.454 | 3.098.454 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_ATRAN.tif | 8.193.050 | 8.193.050 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01.xml | 87.527 | 87.527 | Documento XML |

Figura 47. Archivos "Provisional Surface Temperature". Marcado archivo de temperatura superficial terrestre provisional. (Fuente: Elaboración propia)

También se podrán realizar una serie de comparativas de valores intermedios, por ejemplo se puede descargar la carpeta "Top of Atmosphere" para comprobar la reflectancia TOA de las bandas 4 y 5, la carpeta "Brightness Temperature" para comprobar la temperatura de brillo del satélite en las bandas 10 y 11, o la carpeta "Surface Reflectance" para comprobar la reflectancia de la superficie terrestre en las bandas 4 y 5.

LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_TA.tar - archivo TAR, tamaño descomprimido 313.402.140 bytes

| Nombre | Tamaño | Comprimido | Tipo |
|--|------------|------------|---------------------|
| .. | | | Carpeta de archivos |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_TAB9.tif | 17.852.788 | 17.852.788 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_TAB7.tif | 44.086.976 | 44.086.976 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_TAB6.tif | 43.669.020 | 43.669.020 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_TAB5.tif | 43.448.262 | 43.448.262 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_TAB4.tif | 42.854.398 | 42.854.398 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_TAB3.tif | 39.834.162 | 39.834.162 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_TAB2.tif | 38.537.798 | 38.537.798 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_TAB1.tif | 37.612.352 | 37.612.352 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_SOZ4.tif | 791.553 | 791.553 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_SO44.tif | 890.077 | 890.077 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_SEZ4.tif | 970.167 | 970.167 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_SEA4.tif | 2.115.439 | 2.115.439 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_RADSATQA.tif | 126.939 | 126.939 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_PIXELQA.tif | 374.465 | 374.465 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_LINEAGEQA.tif | 150.217 | 150.217 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01.xml | 87.527 | 87.527 | Documento XML |

Figura 48. Archivos "Top of Atmosphere". Marcados archivos de reflectancia TOA para las bandas 4 y 5. (Fuente: Elaboración propia)

LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_BT.tar - archivo TAR, tamaño descomprimido 27.398.016 bytes

| Nombre | Tamaño | Comprimido | Tipo |
|--|------------|------------|---------------------|
| .. | | | Carpeta de archivos |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_RADSATQA.tif | 126.939 | 126.939 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_PIXELQA.tif | 374.465 | 374.465 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_LINEAGEQA.tif | 150.217 | 150.217 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_BT11.tif | 13.433.630 | 13.433.630 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_BT10.tif | 13.225.238 | 13.225.238 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01.xml | 87.527 | 87.527 | Documento XML |

Figura 49. Archivos "Brightness Temperature". Marcados archivos de temperatura de brillo para las bandas 10 y 11. (Fuente: Elaboración propia)

LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_SR.tar - archivo TAR, tamaño descomprimido 295.861.739 bytes

| Nombre | Tamaño | Comprimido | Tipo |
|--|------------|------------|---------------------|
| .. | | | Carpeta de archivos |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_SRB7.tif | 44.221.098 | 44.221.098 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_SRB6.tif | 44.910.566 | 44.910.566 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_SRB5.tif | 44.643.594 | 44.643.594 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_SRB4.tif | 42.382.394 | 42.382.394 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_SRB3.tif | 40.075.302 | 40.075.302 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_SRB2.tif | 39.551.856 | 39.551.856 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_SRB1.tif | 37.977.016 | 37.977.016 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_SRAEROSOLQA.tif | 1.360.765 | 1.360.765 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_RADSATQA.tif | 126.939 | 126.939 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_PIXELQA.tif | 374.465 | 374.465 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01_LINEAGEQA.tif | 150.217 | 150.217 | Archivo TIF |
| LC08_CU_013008_20190531_20190607_C01_V01.xml | 87.527 | 87.527 | Documento XML |

Figura 50. Archivos "Surface Reflectance". Marcados archivos de reflectancia de la superficie terrestre para las bandas 4 y 5. (Fuente: Elaboración propia)

Todos los métodos que se han tratado en este proyecto tienen en común los apartados de reflectancia de la superficie y temperatura de brillo por lo que comparar estos datos será de gran interés para el futuro cálculo de la temperatura superficial y a su vez independiente del método final de cálculo de LST.

5. Evaluación de métodos y comparativas

Paula de Andrés Anaya

Una vez descargadas las imágenes necesarias se puede proceder a la comparativa, tanto de datos intermedios como de cada uno de los métodos estudiados.

5.3. Métodos de cálculo: evaluación y comparativa

Para poder trabajar a la vez con imágenes ARD y las procesadas en MATLAB ambas deben tener las mismas condiciones geoespaciales; misma resolución espacial y sistema de coordenadas. En este caso ambas imágenes tienen la misma resolución espacial, pero como se ha mencionado en apartados anteriores la proyección cambia. Por ello, el paso previo a la comparativa es hacer una reproyección de las imágenes ARD. Se deberá pasar de la proyección AEA de las imágenes ARD a la proyección UTM de las imágenes Landsat 8, mantener la resolución espacial en treinta metros y finalmente hacer el recorte con el que se trabaja en cada zona.

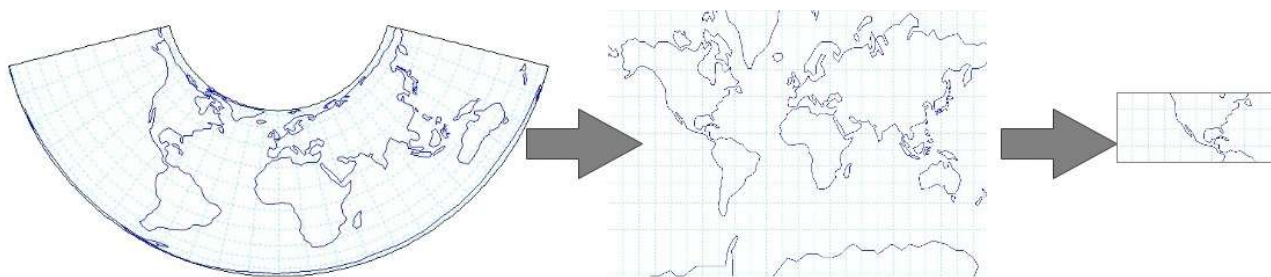


Figura 51. Proceso de trabajo para las imágenes ARD; transformación de la proyección AEA a la proyección UTM y recorte de la zona deseada con una resolución espacial de treinta metros. (Fuente: Elaboración propia)

La reproyección, remuestreo y recorte pueden hacerse desde cualquier sistema de información geográfica, para este trabajo se ha utilizado QGIS.

QGIS es un Sistema de Información Geográfica (SIG) cuya característica principal es que es un software libre, por lo que cualquier usuario puede desarrollar una función, complemento o mejorar las que ya existen. Gracias a esta característica QGIS está en continuo desarrollo. QGIS ofrece de forma continua gran variedad de complementos Python, proporcionados por distintos usuarios. De entre todos los complementos, para este proyecto destaca el plugin "Semi-Automatic Classification", desarrollado por Luca Congedo en 2012 [8]. Este permite la clasificación semiautomática de las imágenes de Landsat 8, por lo que es de gran ayuda para comprobaciones en el cálculo de la reflectancia o temperatura de brillo. También cuenta con muchas herramientas para la descarga de imágenes gratuitas, el preprocesamiento, el postprocesamiento y la calculadora ráster.

Como se ha dicho, la reproyección, remuestreo y recorte pueden hacerse desde QGIS; en los apartados "Guardar como..." y "Ráster" → "Extracción" → "Clipper..."

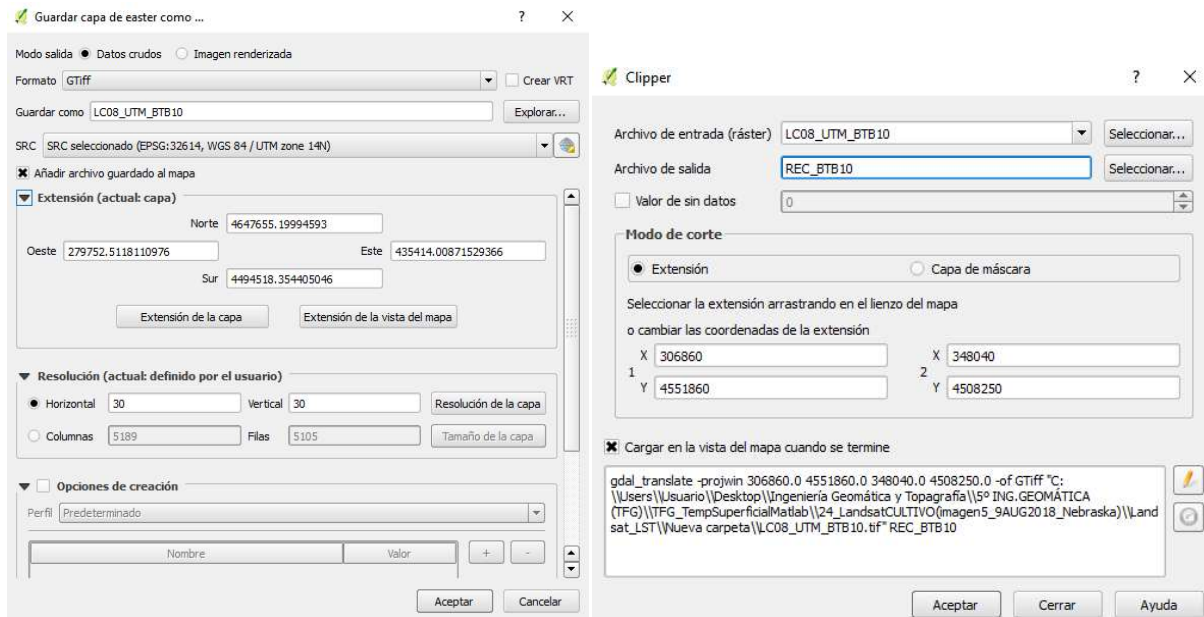


Figura 52. Ejemplo de remuestreo y reproyección (imagen izquierda), y recorte (imagen derecha) desde QGIS (Fuente: Elaboración propia)

Una vez recortadas y reproyectadas las imágenes necesarias se puede pasar a una primera comparativa de las reflectancias de la superficie terrestre y la temperatura de brillo en el satélite. Hechas estas comparativas, y comprobada la coherencia de los resultados, se pasará a evaluar lo que realmente interesa para este proyecto; la temperatura superficial terrestre.

Tabla 10. Error medio cuadrático de reflectancia de superficie, para las bandas 4 y 5, y la temperatura de brillo, en las bandas 10 y 11, entre los cálculos propios (elaborados con Matlab) y los resultados del plugin "Semi-Automatic Classification" de QGIS y los datos directos de las imágenes ARD (Fuente: Elaboración propia)

| | | Imagen 1 cálida Cultivo: Nebraska 9/Agosto/2018 | Imagen 3 fría Desértico: Amarillo 22/Diciembre/2018 |
|---------------------|-----------|---|---|
| Semi-Automatic QGIS | RMSE p4 | 1.3×10^{-16} | 1.9×10^{-9} |
| | RMSE p5 | 8.1×10^{-16} | 2.1×10^{-16} |
| | RMSE TB10 | 2.1×10^{-10} | 2.3×10^{-10} |
| | RMSE TB11 | 1.6×10^{-10} | 2.2×10^{-10} |
| Imágenes ARD | RMSE p4 | 8.0×10^{-5} | 1.6×10^{-4} |
| | RMSE p5 | 4.8×10^{-4} | 9.4×10^{-5} |
| | RMSE TB10 | 0.0576 | 0.0146 |
| | RMSE TB11 | 0.0415 | 0.0136 |

5. Evaluación de métodos y comparativas

Paula de Andrés Anaya

La comparativa con los datos obtenidos por las imágenes ARD es menos precisa que la obtenida por el plugin de QGIS, aun así, se consideran los datos correctos aunque esto puede llevar a errores más groseros a largo plazo ya que estos se van acumulando.

El motivo de esta diferencia de datos es por la falta de decimales en las imágenes ARD (cuatro para reflectancia y uno para temperaturas) y principalmente por el cambio de método para la corrección atmosférica del espectro óptico (Tabla 11); Landsat ARD genera la reflectancia de la superficie utilizando el Código de Reflectancia de la Superficie Landsat (LaSRC), que utiliza la banda de aerosol costero, datos climáticos auxiliares de MODIS y utiliza un modelo único de transferencia radiativa [LANDSAT 8 SURFACE REFLECTANCE CODE (LaSRC) PRODUCT GUIDE L8SDS-1368 Versión 2.0].

Tabla 11. Diferentes tipos de corrección atmosférica en el espectro óptico usadas, para este trabajo y en la NASA para las imágenes ARD. (Fuente: Elaboración propia)

| | Cálculos Matlab | Imágenes ARD |
|--|------------------|---|
| Corrección atmosférica del espectro óptico | Corrección DOS 1 | Código de Reflectancia de la Superficie Landsat (LaSRC) |

Con estos resultados se puede afirmar que gran parte de los cálculos para los métodos de LST (Land Surface Temperature) son correctos. Solo quedaría por comprobar si el resultado final de cada método, es decir, el valor de temperatura superficial terrestre, se aproxima al "verdadero", para ello se considera la imagen de temperatura superficial provisional de ARD como verdad-terreno.

Para esta comparativa se usarán imágenes que abarquen la mayor parte de Estados Unidos, lo más repartidas posibles, teniendo en cuenta los casos de estudios de zonas desérticas, urbanas, de cultivo y forestales (Figura 53), tanto en épocas cálidas como en épocas frías.



Figura 53. Mapa de EE.UU. con los puntos de las zonas estudiadas. Rojo zonas de cultivos, amarillo zonas dérticas, verde zonas forestales y azul zonas urbanas. (Fuente: Elaboración propia)

Esto significa que para cada zona se descargarán 8 imágenes de Landsat 8 (2 x bandas 4, 5, 10 y 11) y sus dos metadatos, dos imágenes de vapor de agua MODIS y dos imágenes de temperatura superficial provisional de ARD, siempre haciendo uso de imágenes con el menor porcentaje de nubosidad posible (por debajo del 2%). Además, en cada imagen se realizarán las transformaciones y recortes necesarios.

En la siguiente tabla (Tabla 12) se muestran los resultados numéricos obtenidos de dicha comparativa.

5. Evaluación de métodos y comparativas

Paula de Andrés Anaya

Tabla 12. Resultados del error medio cuadrático entre las imágenes ARD y los diferentes métodos de obtención de temperatura superficial terrestre. Remarcados los métodos Monocanal 1 (azul), Monocanal 2 (Morado) y simplificado (rojo). (Fuente: Elaboración propia)

| Nº img. | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------------------|--|--|---|---|
| Épocas cálidas | Zona de Cultivo Nebraska 9/Agosto | Zona Forestal Misuri 5/Junio | Zona Desértica Texas 17/Septiembre | Zona Urbana Springfield 1/Agosto |
| | Monocanal 1 0.94º | Split-Window1 0.57º | Monocanal 1 0.73º | Split-Window1 0.86º |
| | Monocanal2 1.33º | Monocanal 1 0.71º | Split-Window1 0.92º | Monocanal2 1.73º |
| | Split-Window1 1.42º | Monocanal2 1.00º | Split-Window2 1.85º | Monocanal 1 2.25º |
| | Simplificado 6.31º | Simplificado 3.31º | Monocanal2 2.10º | Simplificado 4.53º |
| | Split-Window2 8.34º | Split-Window2 6.65º | Simplificado 5.06º | Split-Window2 8.39º |
| | Pv: 0.665 W: 2.940 TS: 311.28 | Pv: 0.229 W: 2.569 TS: 302.47 | Pv: 0.486 W: 2.03 TS: 314.32 | Pv: 0.965 W: 3.16 TS: 301.92 |
| Épocas frías | Zona de Cultivo Nebraska 28/Octubre | Zona Forestal Misuri 27/Octubre | Zona Desértica Texas 22/Diciembre | Zona Urbana Springfield 21/Noviembre |
| | Monocanal2 0.07º | Monocanal2 0.07º | Monocanal2 0.18º | Monocanal2 0.77º |
| | Split-Window2 0.54º | Split-Window1 0.76º | Split-Window1 0.87º | Split-Window2 0.89º |
| | Split-Window1 0.69º | Split-Window2 0.83º | Split-Window2 1.04º | Split-Window1 0.95º |
| | Monocanal 1 1.65º | Monocanal 1 1.66º | Monocanal 1 1.19º | Simplificado 1.51º |
| | Simplificado 2.37º | Simplificado 2.03º | Simplificado 1.67º | Monocanal 1 2.02º |
| | Pv: 0.445 W: 1.65 TS: 294.50 | Pv: 0.933 W: 1.58 TS: 291.65 | Pv: 0.376 W: 0.570 TS: 287.66 | Pv: 0.005 W: 1.29 TS: 282.84 |

| Nº img. | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-------------------|---|---|--|---|
| Épocas cálidas | Zona de Cultivo Burley, IDAHO 8/Agosto | Zona Forestal Redwood Park 1/Julio | Zona Desértica Las Vegas 30/Junio | Zona Urbana Las Vegas 30/Junio |
| | Monocanal1 0.53º | Split-Window2 0.51º | Monocanal1 1.38º | Monocanal1 0.34º |
| | Split-Window1 0.75º | Monocanal1 0.70º | Monocanal2 1.91º | Split-Window1 1.41º |
| | Split-Window2 0.92º | Split-Window1 1.23º | Split-Window2 2.23º | Split-Window2 1.92º |
| | Monocanal2 1.88º | Monocanal2 1.47º | Split-Window1 2.36º | Monocanal2 3.03º |
| | Simplificado 2.94º | Simplificado 2.95º | Simplificado 6.35º | Simplificado 5.80º |
| | Pv: 0.529 W: 1.248 TS: 311.27 | Pv: 0.013 W: 1.890 TS: 303.26 | Pv: 0.330 W: 1.613 TS: 327.83 | Pv: 0.148 W: 1.765 TS: 326.37 |
| Épocas frías | Zona de Cultivo Burley, IDAHO 12/Noviembre | Zona Forestal Redwood Park 6/Noviembre | Zona Desértica Las Vegas 21/Noviembre | Zona Urbana Las Vegas 21/Noviembre |
| | Monocanal2 0.16º | Monocanal2 0.58º | Monocanal2 0.34º | Monocanal2 0.15º |
| | Split-Window2 1.01º | Monocanal1 0.71º | Split-Window2 0.38º | Split-Window2 0.74º |
| | Split-Window1 1.10º | Split-Window1 0.76º | Monocanal1 1.94º | Split-Window1 1.12º |
| | Monocanal1 1.10º | Simplificado 1.06º | Split-Window1 2.15º | Monocanal1 1.52º |
| | Simplificado 1.43º | Split-Window2 1.61º | Simplificado 2.94º | Simplificado 2.30º |
| | Pv: 0.395 W: 0.460 TS: 282.72 | Pv: 0.863 W: 0.706 TS: 285.23 | Pv: 0.482 W: 1.024 TS: 297.62 | Pv: 0.792 W: 1.065 TS: 294.16 |

5. Evaluación de métodos y comparativas

Paula de Andrés Anaya

| Nº img. | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------------------|---|---|--|---|
| Épocas cálidas | Zona de Cultivo Wilmington, C.NORTE 9/Agosto | Zona Forestal Talladega, ALABAMA 15/Marzo (2016) | Zona Desértica Terilingua, TEXAS 30/Mayo | Zona Urbana Ithaca, NY 8/Julio |
| | Split-Window1 0.28º | Monocanal1 0.57º | Split-Window1 1.90º | Split-Window1 0.73º |
| | Monocanal1 3.96º | Split-Window2 0.76º | Simplificado 5.18º | Split-Window2 0.89º |
| | Simplificado 6.99º | Split-Window1 1.31º | Monocanal1 5.98º | Monocanal1 1.03º |
| | Split-Window2 9.51º | Monocanal2 1.43º | Monocanal2 10.76º | Monocanal2 1.16º |
| | Monocanal2 11.20º | Simplificado 2.75º | Split-Window2 13.35º | Simplificado 3.42º |
| | Pv: 0.895 W: 5.027 TS: 304.60 | Pv: 0.703 W: 1.794 TS: 302.22 | Pv: 0.043 W: 2.835 TS: 327.02 | Pv: 0.741 W: 1.955 TS: 303.91 |
| | | | | |
| Épocas frías | Zona de Cultivo Wilmington, C.NORTE 12/Octubre | Zona Forestal Talladega, ALABAMA 25/Octubre (2016) | Zona Desértica Terilingua, TEXAS 24/Diciembre | Zona Urbana Ithaca, NY 7/Noviembre(2016) |
| | Monocanal1 0.09º | Monocanal1 0.31º | Monocanal2 0.51º | Split-Window1 0.37º |
| | Split-Window1 0.31º | Split-Window1 0.53º | Split-Window2 1.18º | Monocanal2 0.59º |
| | Simplificado 1.25º | Split-Window2 1.29º | Monocanal1 1.22º | Monocanal1 0.72º |
| | Monocanal2 1.80º | Monocanal2 1.61º | Split-Window1 1.58º | Simplificado 1.04º |
| | Split-Window2 2.10º | Simplificado 2.10º | Simplificado 2.03º | Split-Window2 1.59º |
| | Pv: 0.873 W: 1.277 TS: 296.66 | Pv: 0.857 W: 1.521 TS: 300.39 | Pv: 0.490 W: 1.188 TS: 294.17 | Pv: 0.609 W: 0.831 TS: 285.63 |
| | | | | |

Para cada una de las zonas seleccionadas, se ha calculado la temperatura superficial terrestre mediante los diferentes métodos calculando la diferencia con la imagen ARD obteniendo su error medio cuadrático. También se han indicado las temperaturas

superficiales, proporción de vegetación y humedad media de cada zona. Este último valor vendrá diferenciado por tres colores diferentes dependiendo de la cantidad; morado menor de 1.2, naranja entre 1.2 y 1.8 y azul mayor que 1.8. Esta división tiene una razón, la cuál se explicará más adelante.

Ordenando los resultados obtenidos en la Tabla 12 en función de la humedad media y los métodos con mejor y peor resultado se obtiene la siguiente tabla (Tabla 13):

Tabla 13. Resumen de los mejores y peores métodos en comparación con la imagen de temperatura superficial de las imágenes ARD, ordenados en función de su humedad media. (Fuente: Elaboración propia)

| Humedad media | <0.5 | 0.5-0.8 | 0.8-1.0 | 1.0-1.2 | 1.2-1.4 | 1.4-1.6 | 1.6-1.8 | 1.8-2.0 | 2.0-3.00 | >3.00 |
|---------------|-------|----------|---------|---------|-------------------------------|---------|---------|---------|----------|----------|
| Nº imágenes | 1 | 2 | 1 | 3 | 3 | 2 | 4 | 2 | 4 | 2 |
| Mejor método | Mon2 | Mon2 | Mon2 | Mon2 | 2xMon1 | 1xMon1 | 3xMon1 | Split1 | 2xMon1 | Split1 |
| | | | | | 1xMon2 | 1xMon2 | 1xMon2 | | 2xSplit1 | |
| Peor método | Simpl | 1xSimpl | Split2 | Simpl | 1xMon1 1xSimpl 1xSplit2 | Simpl | Simpl | Simpl | 1xSimpl | 2xSplit2 |
| | | 1xSplit2 | | | | | | | 3xSplit2 | 1xMon2 |

El peor método o, dicho de otra forma, el método cuyos resultados se alejan más de los obtenidos por las imágenes ARD, es el simplificado. Este resultado era de esperar, ya que como se ha dicho en apartados anteriores, es el método que tiene menos en cuenta factores externos, como es el caso de la humedad.

Teniendo en cuenta aquellos estudios en los que se discrimina el uso del método Split-Window para Landsat 8 por el uso de la banda térmica 11, se reescribe la tabla anterior en la Tabla 14, sin tener en cuenta estos métodos como "mejores métodos".

Tabla 14. Métodos de corrección atmosférica en el espectro térmico que más se aproximan a los resultados obtenidos para nuestros casos de estudios de imágenes ARD. Ordenado por la humedad media MODIS de cada imagen. (Fuente: Elaboración propia)

| W media (g/cm²) | <0.8 | 0.8-1.0 | 1.0-1.2 | 1.2-1.4 | 1.4-1.6 | 1.6-1.8 | 1.8-2.0 | 2.0-3.00 | >3.00 |
|-----------------|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|-------|
| Nº imágenes | 3 | 1 | 3 | 3 | 2 | 4 | 2 | 4 | 2 |
| Mejor método | Mon2 | Mon2 | Mon2 | 2xMon1 | 1xMon1 | 3xMon1 | Mon1 | Mon1 | Mon1 |
| | | | | 1xMon2 | 1xMon2 | 1xMon2 | | | |

5. Evaluación de métodos y comparativas

Paula de Andrés Anaya

También se podría ordenar los resultados teniendo en cuenta su temperatura superficial terrestre media, tal y como se muestra a continuación en la Tabla 15.

Tabla 15. Métodos de corrección atmosférica en el espectro térmico que más se aproximan a los resultados obtenidos para nuestros casos de estudios de imágenes ARD. Ordenado por la temperatura superficial media ARD de cada imagen. (Fuente: Elaboración propia)

| LST media (K) | <285 | 285-290 | 290-295 | 295-300 | 300-302 | 302-304 | 304-310 | 310-320 | >320 |
|---------------|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------|
| Nº imágenes | 2 | 3 | 4 | 2 | 2 | 4 | 1 | 3 | 3 |
| Mejor método | Mon2 | Mon2 | Mon2 | 1xMon1 | 1xMon1 | Mon1 | Mon1 | Mon1 | Mon1 |
| | | | | 1xMon2 | 1xMon2 | | | | |

Analizando ambas tablas podría llegarse a las conclusiones siguientes:

- Para humedades menores a $1,2\text{g/cm}^2$, en color morado, el método más aproximado a los resultados de la NASA es el Monocanal 2.
- Para humedades mayores a $1,8\text{g/cm}^2$, en color azul, el método más aproximado es el Monocanal 1.
- Para los valores intermedios de humedad, en color naranja, los resultados varían entre ambos métodos.

Lo mismo ocurre si analizamos la tabla de temperaturas superficiales:

- Para temperaturas superficiales menores a 295 K el método más aproximado es el Monocanal 2.
- Para temperaturas mayores a 302 K el mejor método es el Monocanal 1.
- Para los valores intermedios también hay variación.

Si se ordenan todas las imágenes por su temperatura media superficial y añadimos su humedad media queda el siguiente resultado (Tabla 16):

Tabla 16. Métodos de corrección atmosférica en el espectro térmico que más se aproximan a los resultados obtenidos para nuestros casos de estudios de imágenes ARD. Ordenado por la temperatura superficial media ARD de cada imagen. (Fuente: Elaboración propia)

| <u>Zona de Cultivo</u> | <u>Zona Urbana</u> | <u>Zona Forestal</u> | <u>Zona Urbana</u> | <u>Zona Desértica</u> |
|------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Burley, IDAHO | Springfield | Redwood Park | Ithaca, NY | Texas |
| 12-nov | 21-nov | 06-nov | 7/Noviembre(2016) | 22-dic |
| M2 | M2 | M2 | M2 | M2 |
| W: 0.460 | W: 1.29 | W: 0.706 | W: 0.831 | W: 0.570 |
| TS: 282.722 | TS: 282.84 (°) | TS: 285.234 | TS: 285.634 | TS: 287.660 |
| <u>Zona Forestal</u> | <u>Zona Urbana</u> | <u>Zona Desértica</u> | <u>Zona de Cultivo</u> | <u>Zona de Cultivo</u> |
| Misuri | Las Vegas | Terilingua, TEXAS | Nebraska | Wilmington, C.NORTE |
| 27-oct | 21-nov | 24-dic | 28-oct | 12-oct |
| M2 | M2 | M2 | M2 | M1 |
| W: 1.58 | W: 1.065 | W: 1.188 | W: 1.65 | W: 1.277 |
| TS: 291.65 (°) | TS: 294.164 | TS: 294.179 | TS: 294.50 (°) | TS: 296.663 |
| <u>Zona Desértica</u> | <u>Zona Forestal</u> | <u>Zona Urbana</u> | <u>Zona Forestal</u> | <u>Zona Forestal</u> |
| Las Vegas | Talladega, ALABAMA | Springfield | Talladega, ALABAMA | Misuri |
| 21-nov | 25/Octubre (2016) | 01-ago | 15/Marzo (2016) | 05-jun |
| M2 | M1 | M2 | M1 | M1 |
| W: 1.024 | W: 1.521 | W: 3.16 | W: 1.794 | W: 2.569 |
| TS: 297.623 | TS: 300.397 | TS: 301.92 | TS: 302.221 | TS: 302.47 |
| <u>Zona Forestal</u> | <u>Zona Urbana</u> | <u>Zona de Cultivo</u> | <u>Zona de Cultivo</u> | <u>Zona de Cultivo</u> |
| Redwood Park | Ithaca, NY | Wilmington, C.NORTE | Burley, IDAHO | Nebraska |
| 01-jul | 08-jul | 09-ago | 08-ago | 09-ago |
| M1 | M1 | M1 | M1 | M1 |
| W: 1.890 | W: 1.955 | W: 5.027 | W: 1.248 | W: 2.940 |
| TS: 303.268 | TS: 303.919 | TS: 304.608 | TS: 311.276 | TS: 311.281 |
| <u>Zona Desértica</u> | <u>Zona Urbana</u> | <u>Zona Desértica</u> | <u>Zona Desértica</u> | |
| Texas | Las Vegas | Terilingua, TEXAS | Las Vegas | |
| 17-sep | 30-jun | 30-may | 30-jun | |
| M1 | M1 | M1 | M1 | |
| W: 2.03 | W: 1.765 | W: 2.835 | W: 1.613 | |
| TS: 314.32 | TS: 326.379 | TS: 327.028 | TS: 327.838 | |

Se comprueba que, por regla general, a mayor temperatura mayor humedad, por lo que se comparten las características necesarias para la elección del método cuyos resultados son los más parecidos a los de las imágenes ARD. En la tabla anterior existen dos imágenes que

5. Evaluación de métodos y comparativas

Paula de Andrés Anaya

no cumplen la regla general (enmarcadas en rojo); la zona de cultivo de Carolina del Norte en octubre y la zona urbana de Springfield en agosto. Con esta información se puede comenzar al desarrollo de un método combinado y mejorado.

5.4. Método mejorado

Se puede comprobar por la Tabla 14 y la Tabla 15 cómo se sigue una pauta en los resultados; para temperaturas superficiales altas con alto nivel de humedad el método más "preciso" (el que más se aproxima a los resultados de las imágenes Landsat ARD) es el Monocanal 1, mientras que para temperaturas superficiales bajas con bajo porcentaje de humedad el mejor método es el Monocanal 2. Hay que tener en cuenta que, para valores altos de humedad, aunque consideremos que el mejor método es el Monocanal 1, los resultados no son del todo precisos. Esto ya lo indicaban diferentes artículos que mencionaban que para valores de humedad mayores de $2,5 \text{ g/cm}^2$ los resultados no eran del todo fiables, incluso con el Monocanal 1 [5]. Para valores intermedios de humedad y temperatura no se aprecian resultados que sigan algún tipo de patrón, oscila entre el Monocanal 1 y el Monocanal 2.

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, el método mejorado se define del siguiente modo:

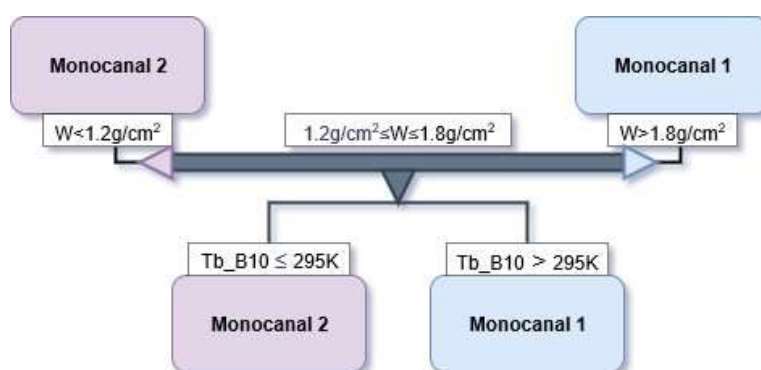


Figura 54. Esquema del "Método mejorado". (Fuente: Elaboración propia)

El primer valor que se debe tener en cuenta es el de humedad:

- $W > 1,8 \text{ g/cm}^2$: Método Monocanal 1.
- $W < 1,2 \text{ g/cm}^2$: Método Monocanal 2.

Para los valores intermedios de humedad el segundo factor a observar sería el de temperatura superficial (siguiendo el patrón de las comparaciones del apartado 6.2), pero

partiendo de la base que es el valor que se quiere obtener no se puede comparar puesto que sería algo redundante. De este modo, se llega a la decisión de abordar este problema usando en su lugar la temperatura de brillo en el satélite ya que ambos valores están muy ligados. Dicho esto, para valores de humedad que se encuentran dentro de la franja de 1,8 g/cm² y 1,2 g/cm² se sigue el siguiente patrón:

- $Tb_{B10} > 295$ K: Monocanal 1.
- $Tb_{B10} \leq 295$ K: Monocanal 2.

A continuación, se comprobarán los resultados de este método mejorado, tanto de forma visual como de forma numérica, para ello se procederá a una nueva comparativa, al igual que se hizo en el apartado 5.3.

5.4.1. Evaluación numérica

El primer paso es realizar una evaluación numérica, es decir, se realizará una nueva comparativa con los resultados de temperatura superficial aportados por las imágenes ARD tomándolos de nuevo como verdad terreno frente a los resultados del nuevo método mejorado, o también denominado "Método recomendado".

Se creará en Matlab el archivo "*LST_MONO_MEJORADO.m*", con el algoritmo creado tal y como se indica en el apartado anterior. Con este archivo se compararán los resultados de temperatura superficial del nuevo método y de la imagen de ARD con la que ya se ha trabajado. Las imágenes con las que se trabaja son las de EE.UU. mencionadas en apartados anteriores. Los resultados son los de la siguiente tabla:

5. Evaluación de métodos y comparativas

Paula de Andrés Anaya

Tabla 17. Resultados del error medio cuadráticos entre las imágenes ARD y el método mejorado.
(Fuente: Elaboración propia)

| MÉTODO MEJORADO | | | | |
|-----------------|---|---|--|--|
| Nº imagen | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Épocas cálidas | Zona de <u>Cultivo</u> Nebraska 9/Agosto | Zona <u>Forestal</u> Misuri 5/Junio | Zona "<u>Desértica</u>" Texas 17/Septiembre | Zona <u>Urbana</u> Springfield 1/Agosto |
| | 0.94 ^º | 0.71 ^º | 0.73 ^º | 2.25 ^º |
| | W: 2.940 TS: 311.281 | W: 2.569 TS: 302.47 | W: 2.03 TS: 314.32 | W: 3.16 TS: 301.92 |
| Épocas frías | Zona de <u>Cultivo</u> Nebraska 28/Octubre | Zona <u>Forestal</u> Misuri 27/Octubre | Zona "<u>Desértica</u>" Texas 22/Diciembre | Zona <u>Urbana</u> Springfield 21/Noviembre |
| | 0.06 ^º | 0.08 ^º | 0.18 ^º | 0.77 ^º |
| | W: 1.65 TS: 294.50 (º) | W: 1.58 TS: 291.65 (º) | W: 0.570 TS: 287.660 | W: 1.29 TS: 282.84 (º) |

| Nº imagen | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------------|--|--|---|--|
| Épocas cálidas | Zona de <u>Cultivo</u> Burley, IDAHO 8/Agosto | Zona <u>Forestal</u> Redwood Park 1/Julio | Zona <u>Desértica</u> Las Vegas 30/Junio | Zona <u>Urbana</u> Las Vegas 30/Junio |
| | 1.39 ^º | 0.70 ^º | 1.38 ^º | 0.34 ^º |
| | W: 1.248 TS: 311.276 | W: 1.890 TS: 303.268 | W: 1.613 TS: 327.838 | W: 1.765 TS: 326.379 |
| Épocas frías | Zona de <u>Cultivo</u> Burley, IDAHO 12/Noviembre | Zona <u>Forestal</u> Redwood Park 6/Noviembre | Zona <u>Desértica</u> Las Vegas 21/Noviembre | Zona <u>Urbana</u> Las Vegas 21/Noviembre |
| | 0.16 ^º | 0.58 ^º | 0.34 ^º | 0.15 |
| | W: 0.460 TS: 282.722 | W: 0.706 TS: 285.234 | W: 1.024 TS: 297.623 | W: 1.065 TS: 294.164 |

| Nº imagen | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----------------|---|---|--|---|
| Épocas cálidas | Zona de Cultivo Wilmington, C.NORTE 9/Agosto | Zona Forestal Talladega, ALABAMA 15/Marzo (2016) | Zona Desértica Terilingua, TEXAS 30/Mayo | Zona Urbana Ithaca, NY 8/Julio |
| | 3.96^º ** | 0.57^º | 5.98^º | 1.03^º |
| | W: 5.027 TS: 304.608 | W: 1.794 TS: 302.221 | W: 2.835 TS: 327.028 | W: 1.955 TS: 303.919 |
| | | | | |
| Épocas frías | Zona de Cultivo Wilmington, C.NORTE 12/Octubre | Zona Forestal Talladega, ALABAMA 25/Octubre (2016) | Zona Desértica Terilingua, TEXAS 24/Diciembre | Zona Urbana Ithaca, NY 7/Noviembre(2016) |
| | 1.34** | 0.29^º | 0.39^º | 0.59^º |
| | W: 1.277 TS: 296.663 | W: 1.521 TS: 300.397 | W: 1.188 TS: 294.179 | W: 0.831 TS: 285.634 |
| | | | | |

Los resaltados en color azul son los que mantienen los resultados del método Monocanal 1, los resaltados en morado mantienen los resultados del método Monocanal 2, los resaltados en color verde mejoran los resultados obtenidos, y por último, los de color rojo, empeoran los resultados con respecto al que se consideraba mejor inicialmente.

Teniendo en cuenta que los resaltados en azul y morado ya eran los mejores métodos, puede afirmarse que los resultados numéricos del método mejorado son muy buenos ya que únicamente empeoran en tres de los veinticuatro casos, incluso mejoran en otros tres de ellos.

5.4.2. Evaluación visual

Los resultados numéricos del método mejorado se dan por buenos y coherentes, pero también hay que evaluar sus resultados de manera visual. Los resultados de la Tabla 17 muestran tres casos diferentes: se mantienen, mejoran o empeoran respecto a los mejores resultados de la Tabla 12.

- Los resultados son los mismos que en la Tabla 12 (marcados en azul o morado), por lo que se usa el mismo método considerado en esa tabla como mejor método. Esto significa que se cumplen las previsiones para el método mejorado, es decir; se encuentra en los extremos de humedad (<1.2 o >1.8) y cumple lo previsto en la Tabla 14.

5. Evaluación de métodos y comparativas

Paula de Andrés Anaya

A continuación se evalúa visualmente una de las imágenes que se encuentra en este caso; la imagen desértica de Amarillo (Texas) del 22 de diciembre de 2018 (imagen 11 de épocas frías):

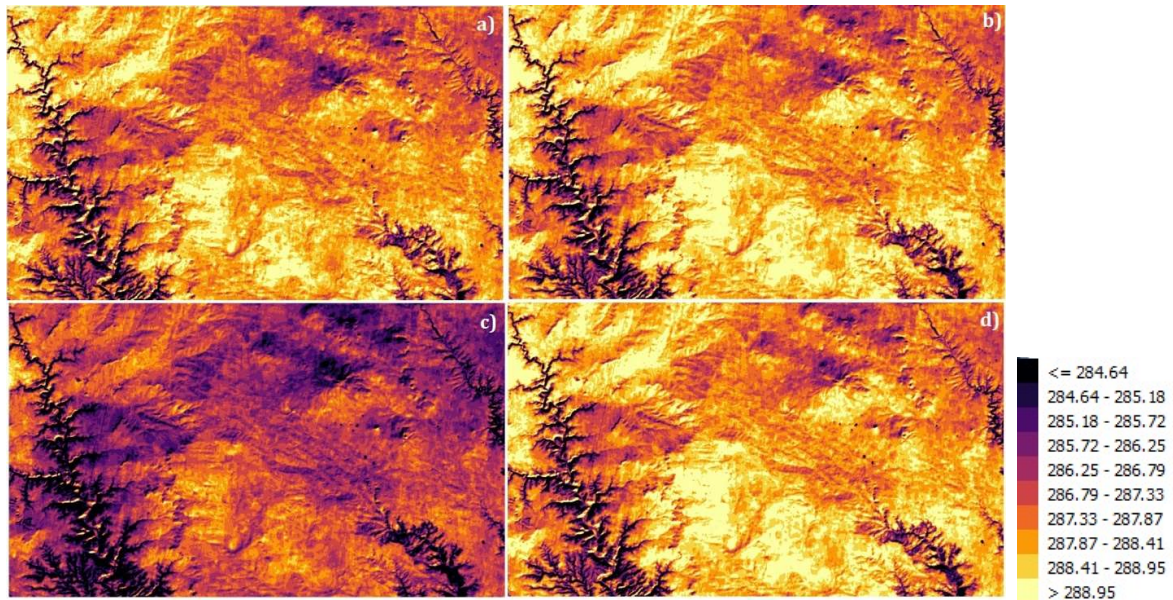


Figura 55. Imágenes de temperatura superficial terrestre de la imagen desértica de Amarillo del 22 de diciembre de 2018: a) Imagen ARD, b) Monocanal 2, c) Monocanal 1 y d) método mejorado. Escala en Kelvin. (Fuente: Elaboración propia)

La Figura 55 muestra como las imágenes resultantes del método Monocanal 2 (b) y del método mejorado (d) son exactamente iguales, además con esta imagen también se comprueba visualmente como estos métodos se aproximan más a la imagen ARD (a) que el método Monocanal 1 (c). Esto también se puede expresar mediante una diferencia de imágenes de manera visual, tal y como muestra a continuación la Figura 56:

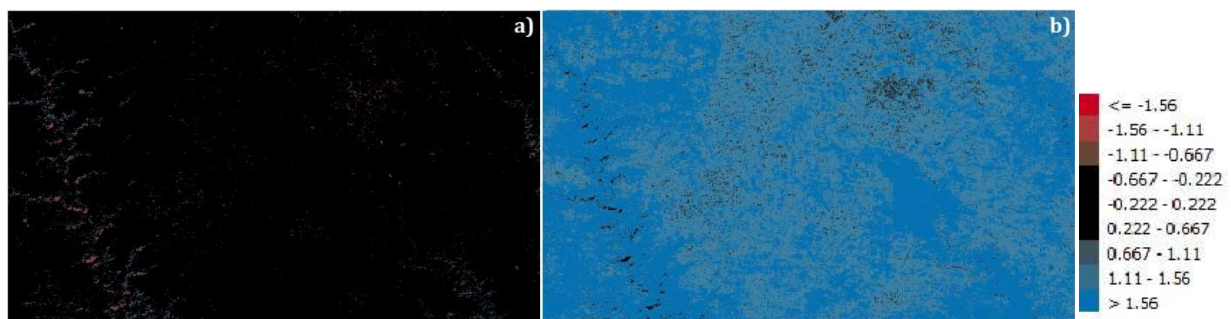


Figura 56. Imágenes de la diferencia de temperatura superficial terrestre, de la desértica de Amarillo del 22 de diciembre de 2018, de la Imagen ARD frente a: a) Monocanal 2 y/o mejorado, b) Monocanal 1. Escala en Kelvin. (Fuente: Elaboración propia)

Visualmente se comprueba en la Figura 56 como el método Monocanal 2 (y en este caso el método mejorado) efectivamente es más aproximado a la imagen ARD. La imagen de humedad que se usa en esta imagen tiene un rango de 0.49 a 0.76, por lo que se encuentra en todo momento por debajo del valor 1.2. Esto explica que en toda la imagen se use el método Monocanal 2 para el método mejorado, por eso el resultado es exactamente el mismo.

- Los resultados son mejores que en la Tabla 12 (marcados en verde), el resultado es diferente al original por lo que se han debido usar los dos métodos incluidos en el mejorado; Monocanal 1 y Monocanal 2. Para que esto ocurra, la humedad se encuentra en diferentes rangos y además cumple lo previsto, tanto en la Tabla 14 como en la Tabla 15, o se encuentra en los valores intermedios de humedad y cumple con el requisito de la temperatura de brillo previsto en la Tabla 15.

Una de las imágenes que se encuentra dentro de este apartado es la imagen forestal de Alabama del 25 de octubre de 2018 (imagen 10 de épocas frías):

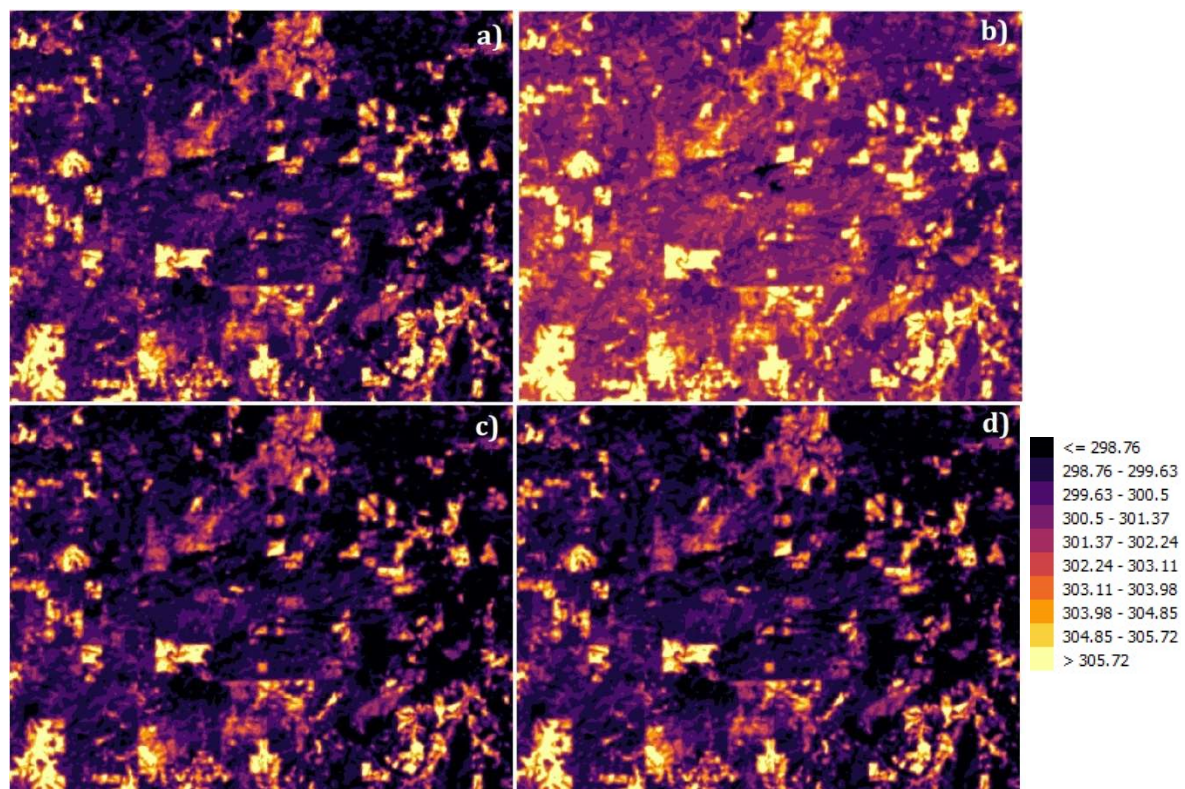


Figura 57. Imágenes de temperatura superficial terrestre de la imagen forestal de Alabama del 25 de octubre de 2018: a) Imagen ARD, b) Monocanal 2, c) Monocanal 1 y d) método mejorado. Escala en Kelvin. (Fuente: Elaboración propia)

5. Evaluación de métodos y comparativas

Paula de Andrés Anaya

La Figura 57 muestra como las imágenes resultantes del método Monocanal 1 (c) y del método mejorado (d) son prácticamente iguales, por lo menos a simple vista, también se comprueba visualmente como estos métodos se aproximan más a la imagen ARD (a) que el método Monocanal 2 (b). Para comprobar que de verdad existe una diferencia de temperaturas entre el Monocanal 1 y el mejorado se recurre a la imagen de diferencias:

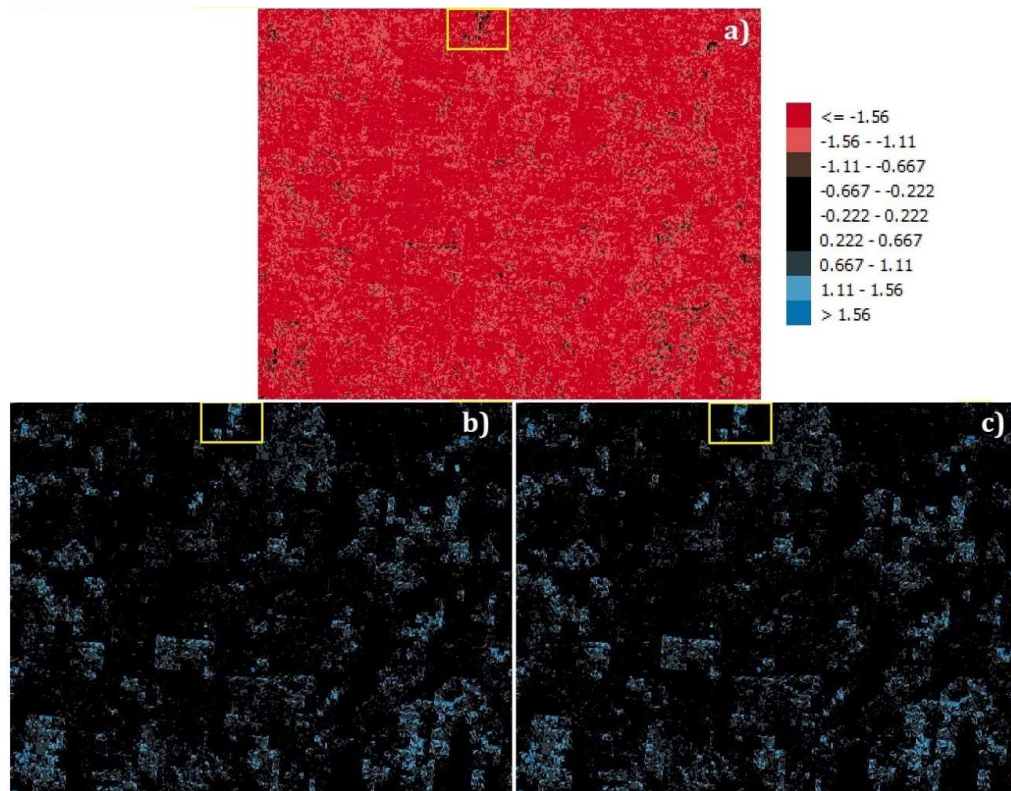


Figura 58. Imágenes de la diferencia de temperatura superficial terrestre, de la imagen forestal de Alabama del 25 de octubre de 2018, de la Imagen ARD frente a: a) Monocanal 2, b) Monocanal 1 y c) método mejorado. Escala en Kelvin. (Fuente: Elaboración propia)

Si se amplía la imagen anterior se pueden apreciar diferentes zonas de mejoría con el método mejorado, como el siguiente ejemplo:

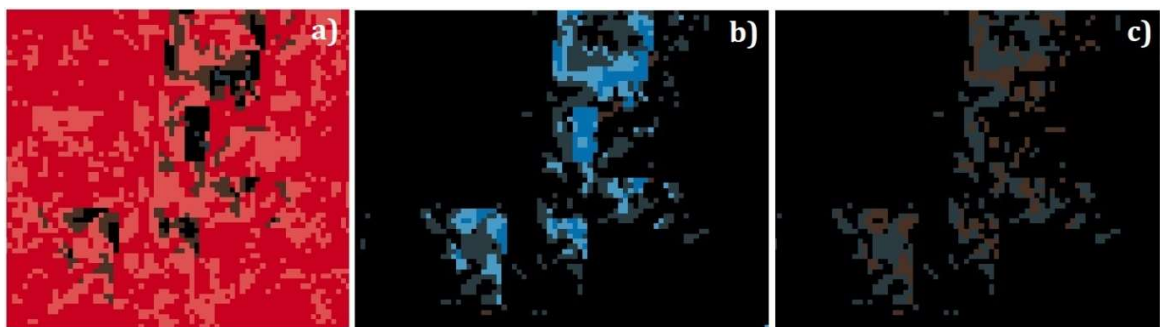


Figura 59. Zoom de la Figura 58 donde se aprecia la mejoría del método mejorado frente al método Monocanal 1. (Fuente: Elaboración propia)

En el caso de esta imagen se produce la mejoría ya que se encuentra en los valores intermedios de humedad para toda la imagen y cumple con el requisito de la temperatura de brillo previsto en la Tabla 15. Los valores de píxel que varían vienen definidos por la temperatura de brillo del satélite, al disminuir de los 295 K pasa a calcular la temperatura superficial con el método Monocanal 2.

- Los resultados son peores que en la Tabla 12 (marcados en rojo), el resultado es diferente al original por lo que se han debido usar los dos métodos incluidos en el mejorado. Para que esto ocurra, la humedad se debe encontrar en diferentes rangos, o simplemente son aquellos casos de la Tabla 16 que se salían de la tendencia.

Una de las imágenes que se encuentra dentro de este apartado es la imagen de cultivo de Burley (Idaho) del 8 de agosto de 2018 (imagen 5 de épocas cálidas):

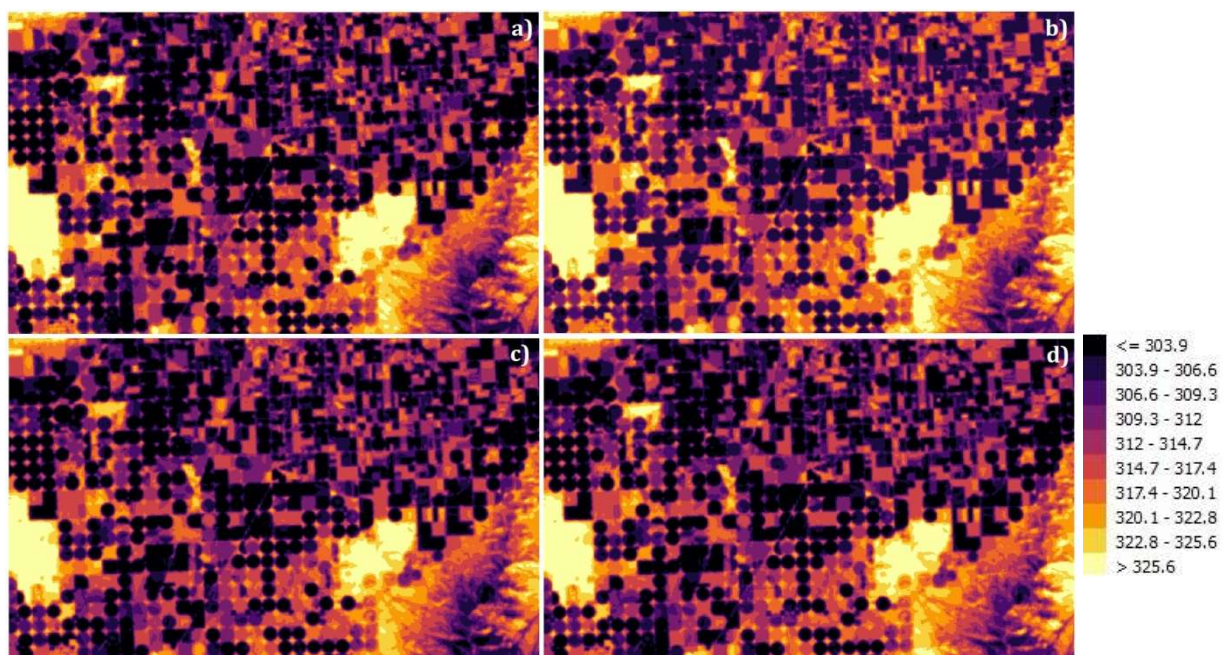


Figura 60. Imágenes de temperatura superficial terrestre de la imagen de cultivo de Burley del 8 de agosto de 2018: a) Imagen ARD, b) Monocanal 2, c) Monocanal 1 y d) método mejorado. Escala en Kelvin. (Fuente: Elaboración propia)

Observando la Figura 60, a simple vista no se aprecia la diferencia de temperaturas entre el Monocanal 1 (c) y el método mejorado (d), incluso no se distingue bien que el método Monocanal 2 (b) es el más inexacto. Haciendo zoom en las imágenes estas diferencias se aprecian mejor, pero para poder distinguirlo con claridad la siguiente figura resuelve todas las dudas:

5. Evaluación de métodos y comparativas

Paula de Andrés Anaya

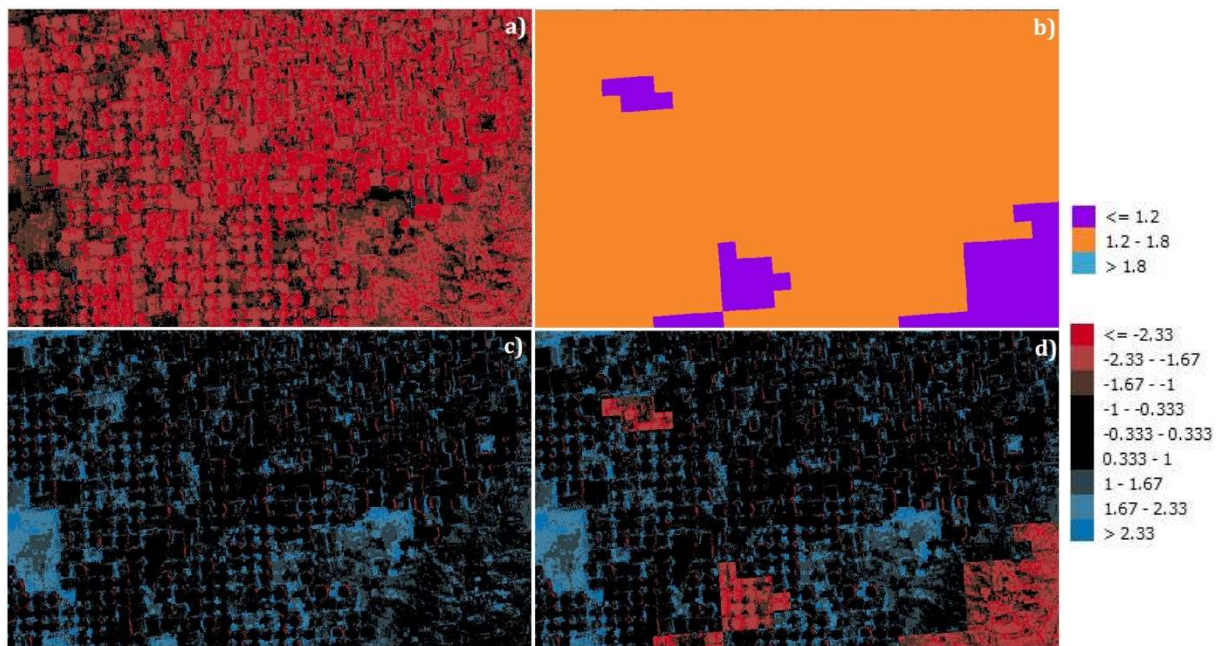


Figura 61. Imágenes de la diferencia de temperatura superficial terrestre, de la imagen de cultivo de Burley del 8 de agosto de 2018, de la Imagen ARD frente a: a) Monocanal 2, c) Monocanal 1 y d) método mejorado. La imagen b) muestra la humedad. Escala superior en g/cm² y escala inferior en Kelvin.
 (Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 61 se observa como el método Monocanal 2 (a) es el más inexacto, pero además se aprecia con claridad la diferencia de la que se hablaba al principio, entre el Monocanal 1 (c) y el método mejorado (d). La diferencia que aparece en el método mejorado viene dada por el hecho de que la humedad se encuentra en diferentes rangos, esto se puede ver en la imagen b) de la Figura 61. Aquellas zonas donde la humedad es menor que 1.2 cambia el método al Monocanal 2, por eso en la imagen d) aparecen esas zonas rojas.

Por último, para mostrar del segundo caso de imágenes con resultados peores, se visualiza una de las dos imágenes que ya se predijo en la Tabla 16 que empeoraría con el método mejorado (puesto que no cumple con la tendencia establecida se marcó con un recuadro rojo). Esta imagen es la imagen urbana de Springfield del 1 de agosto de 2018 (imagen 4 de épocas cálidas):

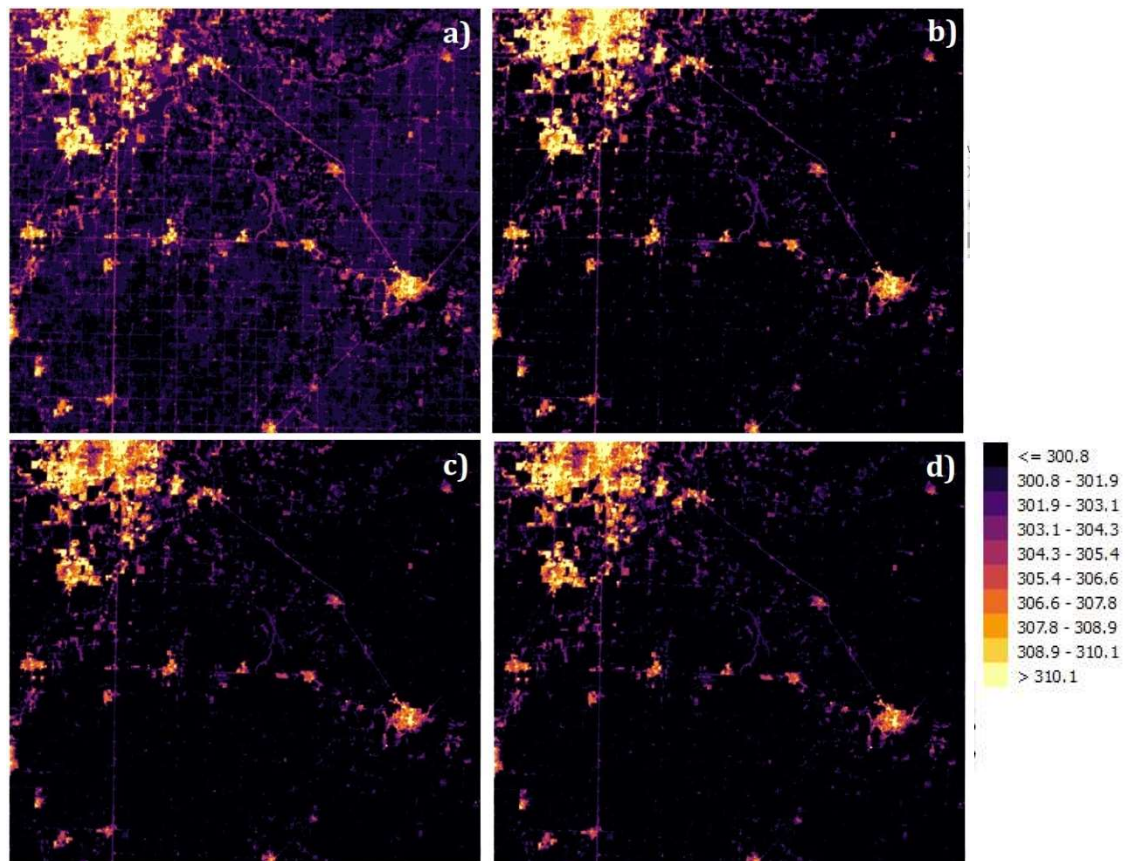


Figura 62. Imágenes de temperatura superficial terrestre de la imagen urbana de Springfield del 1 de agosto de 2018: a) Imagen ARD, b) Monocanal 2, c) Monocanal 1 y d) método mejorado. Escala en Kelvin. (Fuente: Elaboración propia)

Visualmente en la Figura 62 no se aprecia claramente cuál de los métodos Monocanal se aproxima más a la imagen ARD, por lo que se realiza de nuevo una diferencia entre la imagen ARD y ambas imágenes de los métodos Monocanal (la diferencia de la imagen ARD con la imagen mejorada no se realiza puesto que esta es igual a la Monocanal 1):

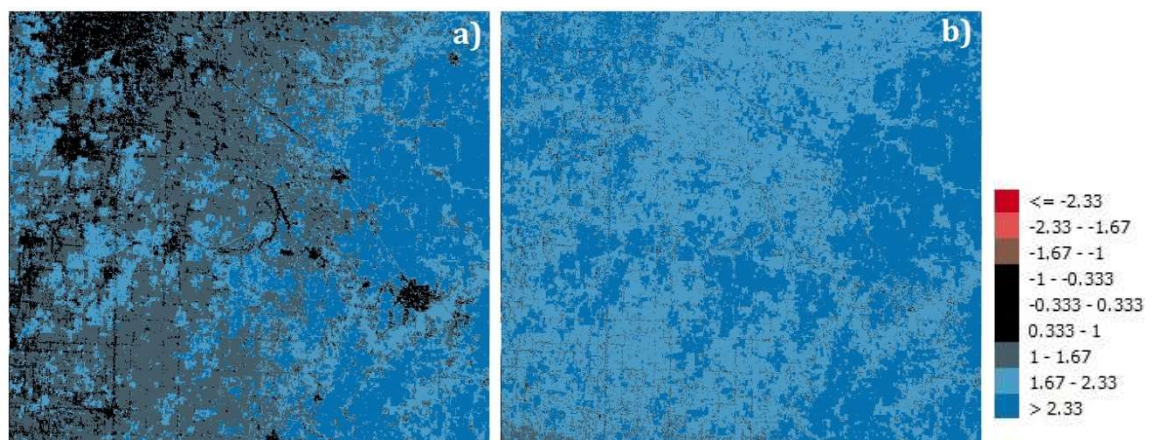


Figura 63. . Imágenes de la diferencia de temperatura superficial terrestre, de la imagen urbana de Springfield del 1 de agosto de 2018, de la Imagen ARD frente a: a) Monocanal 2, b) Monocanal 1. Escala en Kelvin. (Fuente: Elaboración propia)

5. Evaluación de métodos y comparativas

Paula de Andrés Anaya

Visualmente en la Figura 63, se comprueba que a pesar de ser el método Monocanal 1 igual que el método recomendado este no es el más preciso, siendo el Método Monocanal 2 más exacto a pesar de no seguir las indicaciones descritas

A continuación, se detallará la creación del software informático en el que se implementará este método mejorado, al que se denominará "Método recomendado", a parte de aquellos métodos vistos anteriormente.

6. TEMISAT: Temperature from satellite image.

Como se ha visto hasta ahora, existe gran variedad de metodologías para el cálculo de la temperatura superficial terrestre mediante el uso de imágenes de satélite. Estas metodologías destacan por el elevado número de ecuaciones y expresiones matemáticas por las que están formadas, por ello es importante desarrollar una automatización del cálculo.

Aunque existen programas y herramientas que dan cálculos intermedios, como es el caso antes mencionado del plugin de QGIS, no existe un software que permita el cálculo de la temperatura superficial terrestre tomando como datos de entrada imágenes satelitales, tanto de imágenes de satélites de recursos naturales como satélites dedicados al estudio del agua, como pueden ser las de Landsat y Modis. Tras un estudio en profundidad de los diferentes métodos existentes y comprobada su validez, se procede a alcanzar el objetivo principal marcado por el presente trabajo fin de grado; el desarrollo de un software informático capaz de estimar la temperatura superficial terrestre tomando como datos de entrada solamente imágenes satelitales.

Esta herramienta informática, denominada **TEMISAT** e **inscrita en el registro de propiedad intelectual** (ANEXO I. Propiedad intelectual TEMISAT), permite obtener la TEMperatura superficial mediante Imágenes SATelitales, utilizando como lenguaje de programación MATLAB.



Figura 64. Imagen de inicio TEMISAT. (Fuente: Elaboración propia)

En los próximos apartados se expondrá de manera detallada el código de programación, así como su interfaz gráfica.

6.1. Código de programación

Todo el código de programación de TEMISAT se ha llevado a cabo con lenguaje Matlab. El archivo principal de código es el denominado "*Temisat.m*" que hace uso de 17 funciones (.m) (ANEXO II), los cuales tienen las siguientes funciones:

- *TemperaturaBrillo.m*: calcula la temperatura de brillo en el satélite.
- *reflectancia.m*: calcula el efecto bruma y la reflectancia de la superficie.
- *radiancia.m*: calcula la radiancia en el sensor.
- *Pvf.m*: calcula el porcentaje de vegetación.
- *PSImonoTotal.m*: calcula los valores de ψ_1 , ψ_2 y ψ_3 para el método mejorado.
- *PSImono2.m*: calcula los valores de ψ_1 , ψ_2 y ψ_3 para el método Monocanal 2.
- *PSImono1.m*: calcula los valores de ψ_1 , ψ_2 y ψ_3 para el método Monocanal 1.
- *NDVIf.m*: calcula el NDVI.
- *metadatos.m*: Extrae de manera automática los datos necesarios para el cálculo de la temperatura superficial del archivo .txt de metadatos de Landsat 8.
- *LSTsplit2.m*: Calcula la temperatura superficial mediante el método Split-Window 2.
- *LSTsplit1.m*: Calcula la temperatura superficial mediante el método Split-Window 1.
- *LSTsimpl.m*: Calcula la temperatura superficial mediante el método simplificado.
- *LSTmono.m*: Calcula la temperatura superficial mediante el método general Monocanal. Se diferencia entre Monocanal 1 y Monocanal 2 por los valores de ψ_1 , ψ_2 y ψ_3 .
- *GammaDelta.m*: Calcula los valores de γ y δ para la ecuación final de cálculo de temperatura superficial del método Monocanal.
- *emisividad11.m*: Calcula la emisividad de la banda 11 de Landsat 8.
- *emisividad10.m*: Calcula la emisividad de la banda 10 de Landsat 8.
- *eincrsplit.m*: Calcula la emisividad media y el incremento de las emisividades de las bandas 10 y 11 de Landsat 8.

6.2. Interfaz gráfica

Para poder visualizar todo el código de programación antes mencionado, debe estar incluido en una interfaz gráfica (GUI), para permitir gestionar y representar las acciones y la información que aporta el código fuente y así permitir al usuario un uso sencillo, intuitivo y funcional de la herramienta.

Para la creación de la interfaz se sigue empleando MATLAB, ya que cuenta con una herramienta adicional llamada GUIDE (entorno de desarrollo de interfaces gráficas de usuario), que permite crear una GUI de manera interactiva diseñando gráficamente la interfaz de usuario mediante controles tales como menús, barras de herramientas, botones... Además, GUIDE genera de manera automática el código de MATLAB para construir la interfaz, el cual se puede modificar para programar sus órdenes o ejecuciones.

MATLAB, pese a tener la capacidad de generar una interfaz gráfica, presenta limitaciones visuales ya que ofrece las funcionalidades y controles básicos. Aun así, la importancia de este software viene dado por su potencial matemático y no gráfico, de ahí viene su elección como ya se ha dicho en apartados anteriores.

Todo el código antes mencionado viene ligado a un archivo denominado "*Temisat.fig*", este tipo de archivo contiene una figura gráfica, es decir, contiene la interfaz gráfica del programa. Cuando se ejecuta este archivo desde el apartado GUIDE aparece la pantalla de la Figura 65.

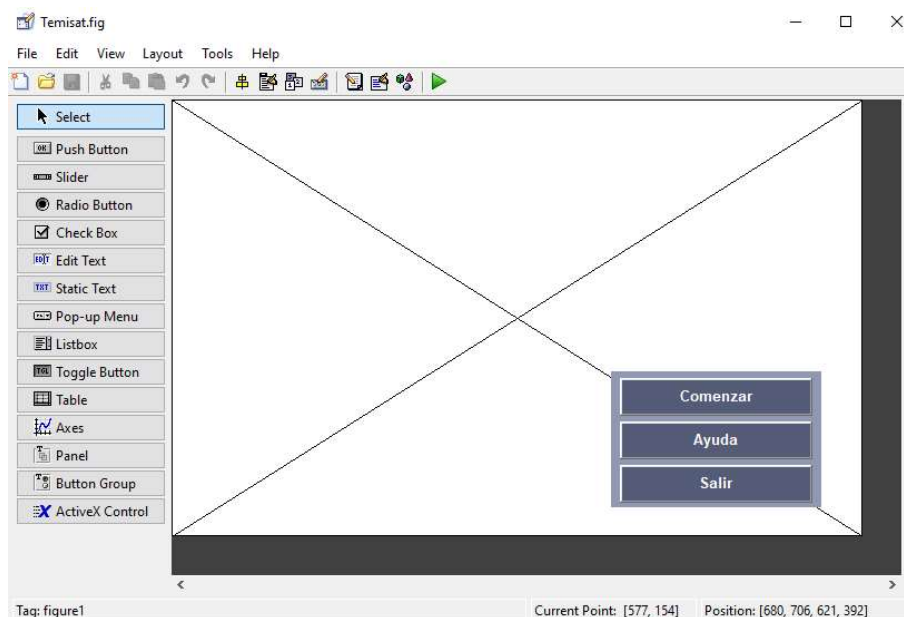


Figura 65. Ventana de GUIDE en MATLAB. (Fuente: Elaboración propia)

Este es el apartado de Matlab donde se incorporan todas las figuras de la interfaz gráfica. En la imagen anterior no se aprecian todos los elementos de los que consta TEMISAT, pero de manera resumida cuenta con cinco paneles. El primero de ellos, el que se aprecia en la Figura 66, es el inicio del programa. Gracias a este panel el usuario puede comenzar a hacer uso del software así como salir o acceder a la ayuda del programa de la que posteriormente se hablara de manera detallada.

6. TEMISAT: software para el cálculo de temperatura superficial terrestre mediante imágenes satelitales

Paula de Andrés Anaya



Figura 66. Pantalla de inicio TEMISAT. (Fuente: Elaboración propia)

Al comenzar el programa, aparece una nueva ventana (Figura 67) compuesta por cuatro pestañas que se irán activando a medida que se va avanzando en el proceso del cálculo de la temperatura superficial. La primera de ellas, sirve para la carga de datos en función del método de cálculo que haya escogido el usuario. En concreto, TEMISAT cuenta con todos los métodos descritos y desarrollados anteriormente, incluido el método mejorado al que se le denomina “Método RECOMENDADO”.



Figura 67. Pantalla "Carga de Datos" TEMISAT. (Fuente: Elaboración propia)

Como ya se ha descrito anteriormente, dependiendo del método seleccionado se necesitan unas imágenes u otras (Tabla 18), por lo que TEMISAT permitirá al usuario cargar uno u otros datos dependiendo del método tal y como muestra la siguiente figura:

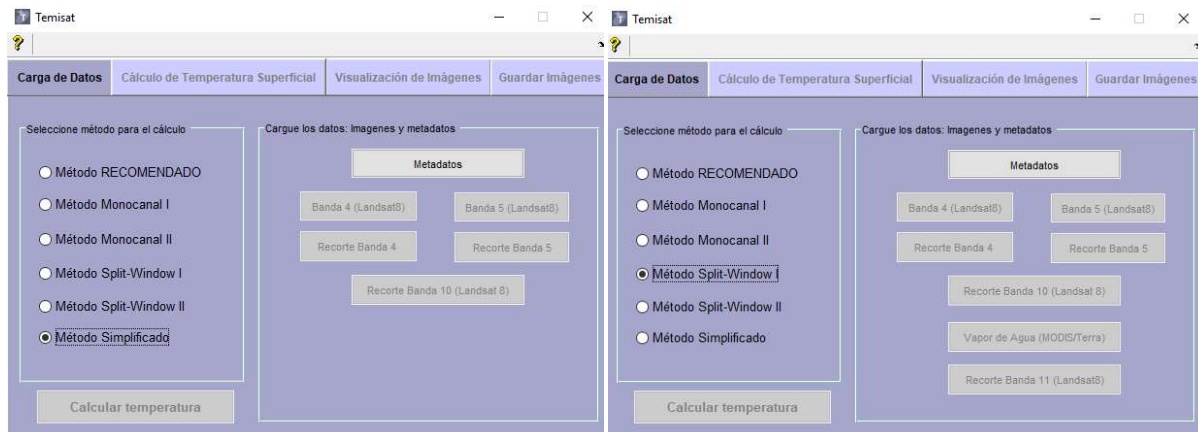


Figura 68. Diferencia de botones activos en la interfaz de TEMISAT dependiendo del método seleccionado; método simplificado a la izquierda y método Split-Window a la derecha. (Fuente: Elaboración propia)

| | Banda 4 (RED) | Banda 5 (NIR) | Banda 10 (TIRS1) | Banda 11 (TIRS2) | Vapor de agua precipitable (MOD05_L2) |
|----------------------------|---------------|---------------|------------------|------------------|---------------------------------------|
| Método recomendado | ✓ | ✓ | | | ✓ |
| Monocanal 1 | ✓ | ✓ | | | ✓ |
| Monocanal 2 | ✓ | ✓ | | | ✓ |
| Split-Window1 | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ |
| Split-Window2 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Método simplificado | ✓ | ✓ | ✓ | | |

Tabla 18. Tabla que muestra las imágenes necesarias, y por tanto pestañas activas, dependiendo del método seleccionado. (Fuente: Elaboración propia)

Gracias a la sencillez e intuitividad del software, el usuario podrá conocer en todo momento si ha cargado correctamente los datos, tanto las imágenes como los metadatos, puesto que a medida que se vayan cargando los datos, los botones se cambian de color, verde en caso de que la carga del dato sea correcta y rojo mediante una advertencia si es erróneo (Figura 69).

6. TEMISAT: software para el cálculo de temperatura superficial terrestre mediante imágenes satelitales

Paula de Andrés Anaya

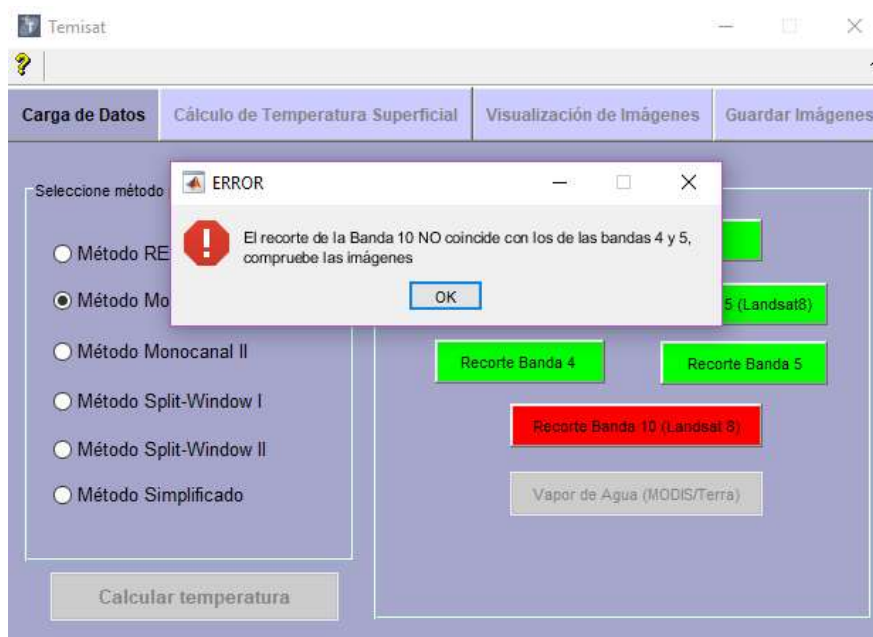


Figura 69. Pantalla con imagen errónea en la carga de datos TEMISAT. (Fuente: Elaboración propia)

La segunda pestaña denominada "Cálculo de Temperatura Superficial" se activa una vez ejecutado el proceso de cálculo en la pestaña anterior. En la parte inferior hay una barra que indica el progreso, y a su vez en el cuadro de texto superior aparecen una serie de mensajes y datos de interés que indican en que parte del proceso se encuentra (Figura 70).

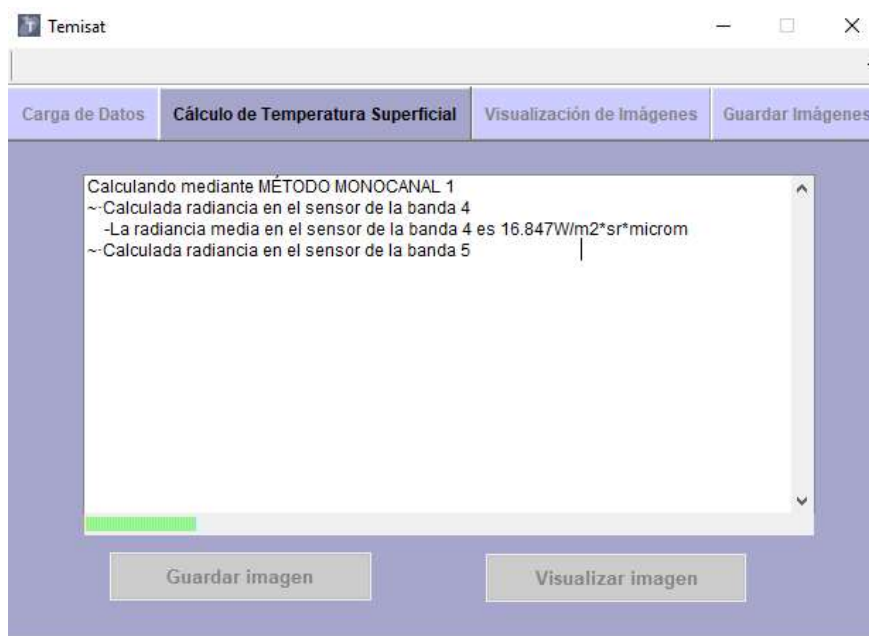


Figura 70. Pantalla "Cálculo de Temperatura Superficial" TEMISAT. (Fuente: Elaboración propia)

Finalizado el proceso del cálculo, se activan las dos últimas pestañas; "Visualización de Imágenes" y "Guardar Imágenes".

En el apartado de visualización, por defecto, la imagen que se visualiza es la imagen de temperatura superficial, aunque la barra desplegable dan otra serie de opciones de visualización (Figura 71).

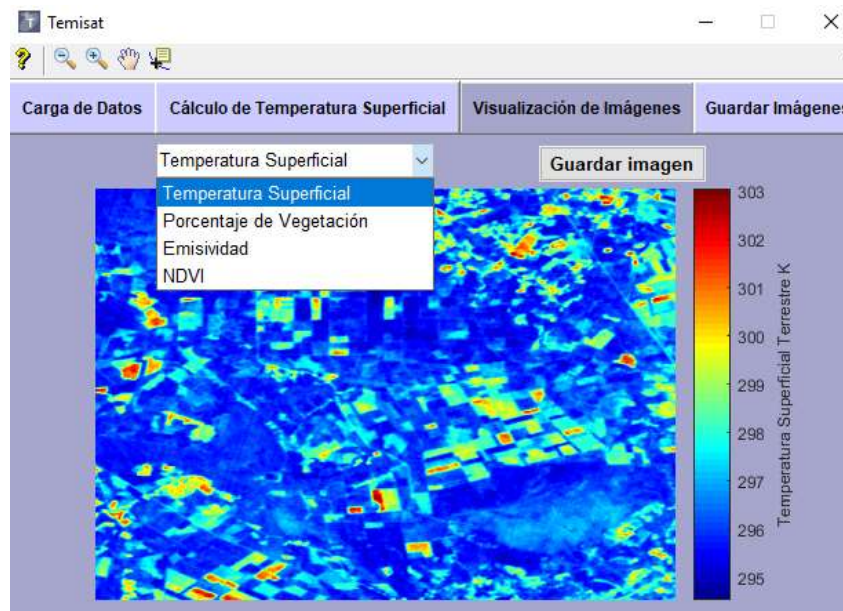


Figura 71. Opciones de imágenes a visualizar en TEMISAT. (Fuente: Elaboración propia)

Pero en esta ventana no solamente se pueden observar resultados, sino que el usuario puede consultar valores, ampliar, disminuir incluso moverse por la imagen gracias a la existencia de diferentes herramientas adicionales, localizadas en la parte superior. Un ejemplo del uso de estas herramientas se muestra en la Figura 72.

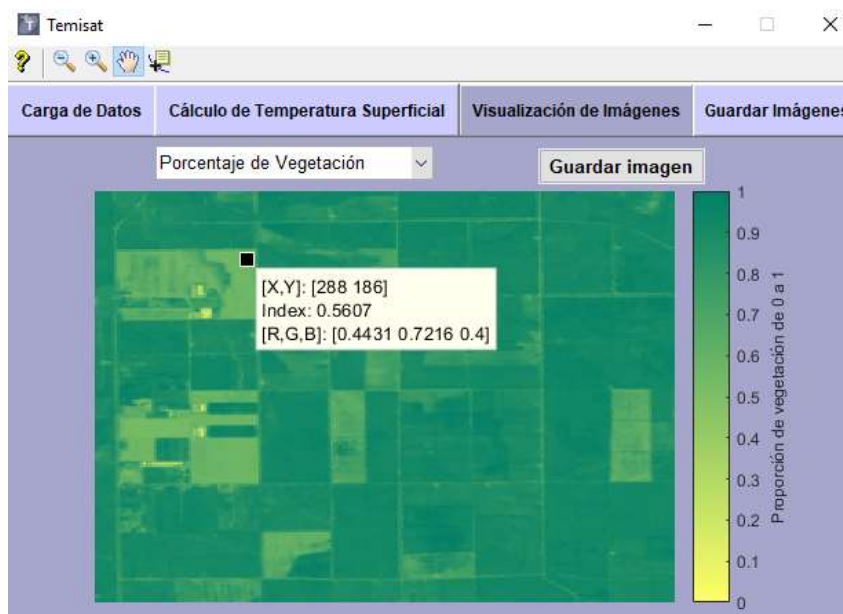


Figura 72. Ejemplos de uso de las herramientas de visualización TEMISAT. (Fuente: Elaboración propia)

6. TEMISAT: software para el cálculo de temperatura superficial terrestre mediante imágenes satelitales

Paula de Andrés Anaya

Por una parte, el usuario podrá guardar cada uno de los archivos resultantes por separado indicando en todo momento la ruta del directorio en la que lo quiere guardar permitiendo así solamente guardar aquellos que le interesen. Por otra parte, si el usuario está interesado en guardar todos los resultados obtenidos, tan solo con hacer uso del botón “Guardar Todo” podrá guardar en el directorio que indique todos los resultando que de manera automática serán nombrados.

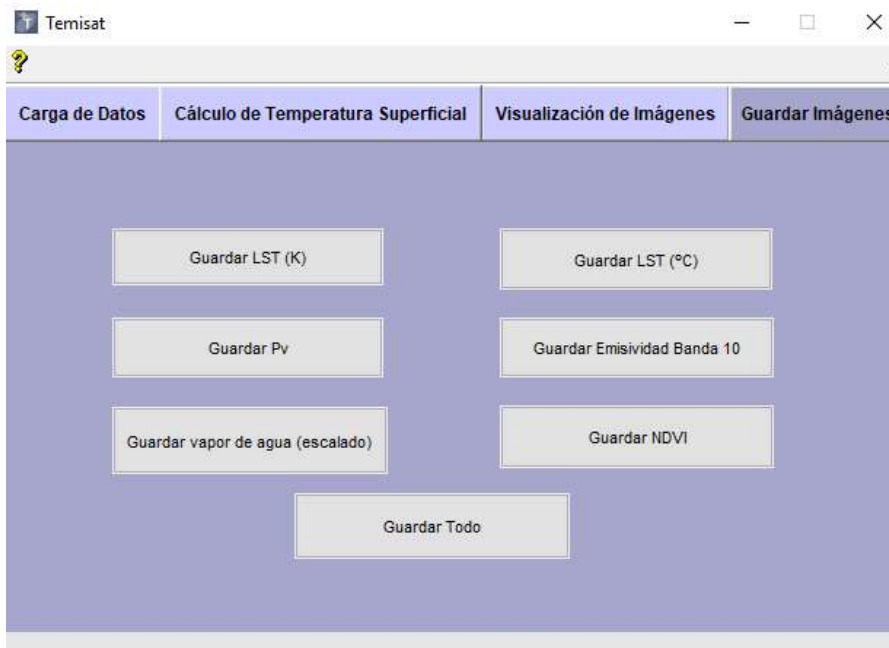


Figura 73. Pantalla "Guardar Imágenes" TEMISAT. (Fuente: Elaboración propia)

Dependiendo del método seleccionado en el primer apartado del programa, se da la opción de guardar unas u otras imágenes:

Tabla 19. Imágenes de salida en el programa TEMISAT dependiendo del método de cálculo de temperatura superficial seleccionado. (Fuente: Elaboración propia)

| | Imágenes de salida | | | | | |
|-----------------------|--------------------|----|-------|-------|------------|-----|
| | NDVI | PV | e B10 | E B11 | W escalada | LST |
| Método RECOMENDADO | X | X | X | | X | X |
| Método Monocanal 1 | X | X | X | | X | X |
| Método Monocanal 2 | X | X | X | | X | X |
| Método Split-Window 1 | X | X | X | X | X | X |
| Método Split-Window 2 | X | X | X | X | X | X |
| Método simplificado | X | X | X | | | X |

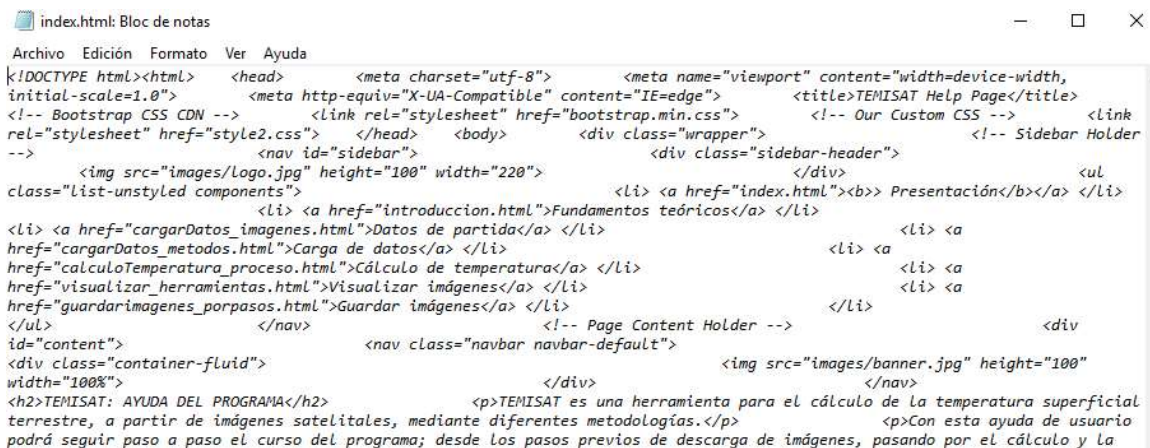
6.2.1. Ayuda del programa

Con el fin de ayudar al usuario en el correcto uso del software, TEMISAT lleva asociado una ayuda del programa a la que se puede acceder en todo momento mediante el símbolo "?" situado en la parte superior de la ventana, o en el caso de la pantalla de inicio desde el botón "Ayuda" (Figura 66). Debido a las limitaciones que presenta Matlab en cuanto a interfaz gráfica se refiere, mencionadas anteriormente, la ayuda ha sido desarrollada mediante HTML tomando como punto de partida una plantilla base [31] y utilizando para su edición el editor de texto TextPad.

TextPad es un editor de texto para sistemas operativos Windows. Es una herramienta útil para sustituir al bloc de notas habitual, el cual no es nada intuitivo para la escritura de archivos HTML.



Este es el motivo principal por el que se usa TextPad, ya que la lectura de lenguaje HTML es más intuitiva, como muestra la Figura 75, frente al convencional Bloc de notas de Windows, como muestra la Figura 74.

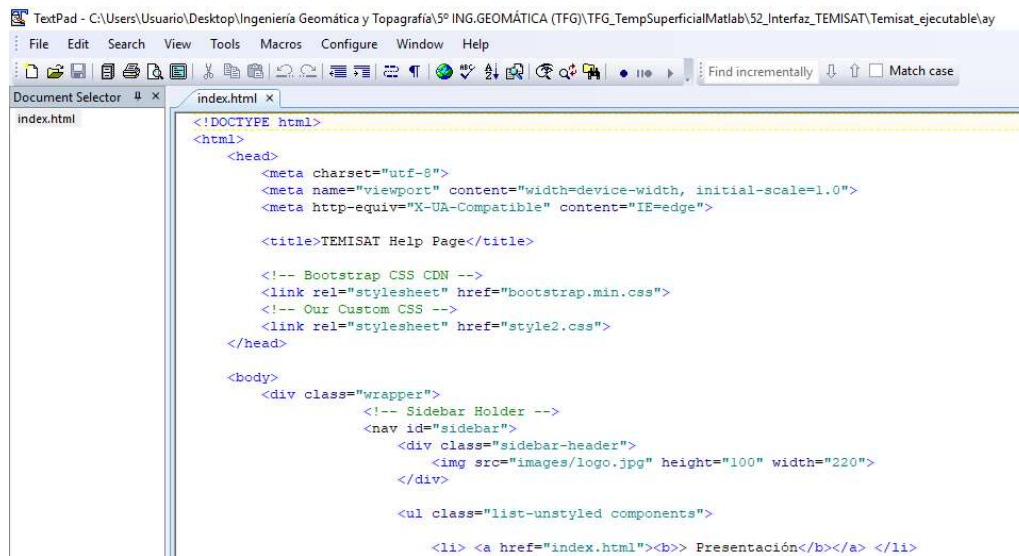


```
index.html: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
<!DOCTYPE html><html> <head> <meta charset="utf-8"> <meta name="viewport" content="width=device-width,
initial-scale=1.0"> <meta http-equiv="X-UA-Compatible" content="IE=edge"> <title>TEMISAT Help Page</title>
<!-- Bootstrap CSS CDN --> <link rel="stylesheet" href="bootstrap.min.css"> <!-- Our Custom CSS --> <link
rel="stylesheet" href="style2.css"> </head> <body> <div class="wrapper"> <!-- Sidebar Holder
--> <nav id="sidebar"> <div class="sidebar-header">
 </div> <ul
class="list-unstyled components">
<li> <a href="introduccion.html">Fundamentos teóricos</a> </li>
<li> <a href="cargarDatos_imagenes.html">Datos de partida</a> </li>
<li> <a href="cargarDatos_metodos.html">Carga de datos</a> </li>
<li> <a href="calculoTemperatura_proceso.html">Cálculo de temperatura</a> </li>
<li> <a href="visualizar_herramientas.html">Visualizar imágenes</a> </li>
<li> <a href="guardarimagenes_porpasos.html">Guardar imágenes</a> </li>
</ul> </nav> <!-- Page Content Holder --> <div
id="content">
<div class="container-fluid">
width="100%">
<h2>TEMISAT: AYUDA DEL PROGRAMA</h2>
<p>TEMISAT es una herramienta para el cálculo de la temperatura superficial
terrestre, a partir de imágenes satelitales, mediante diferentes metodologías.</p>
<p>Con esta ayuda de usuario
podrá seguir paso a paso el curso del programa; desde los pasos previos de descarga de imágenes, pasando por el cálculo y la
```

Figura 74. Ejemplo de archivo HTML abierto con el Bloc de notas de Windows. (Fuente: Elaboración propia)

6. TEMISAT: software para el cálculo de temperatura superficial terrestre mediante imágenes satelitales

Paula de Andrés Anaya



```
<!DOCTYPE html>
<html>
  <head>
    <meta charset="utf-8">
    <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
    <meta http-equiv="X-UA-Compatible" content="IE=edge">

    <title>TEMISAT Help Page</title>

    <!-- Bootstrap CSS CDN -->
    <link rel="stylesheet" href="bootstrap.min.css">
    <!-- Our Custom CSS -->
    <link rel="stylesheet" href="style2.css">
  </head>

  <body>
    <div class="wrapper">
      <!-- Sidebar Holder -->
      <nav id="sidebar">
        <div class="sidebar-header">
          
        </div>

        <ul class="list-unstyled components">
          <li><a href="index.html"><b></b></a></li>
```

Figura 75. Ejemplo de archivo HTML abierto con TextPad. (Fuente: Elaboración propia)

Se puede apreciar como con TextPad la lectura de HTML es más intuitiva por sus colores y el uso de tabuladores. Para este trabajo se usa la versión de prueba 8.

Como se ha mencionado al principio del apartado, se puede acceder a la ayuda de TEMISAT desde todas las pantallas del programa, incluso cuenta con la ventaja que dependiendo de la ventana en la que el usuario se encuentre se abre una u otra pantalla de ayuda. Para facilitar este proceso se han programado distintos archivos HTML:

- index.html: Página de presentación. Se accede desde la pantalla principal de TEMISAT.
- cargarDatos_metodos.html: Página de ayuda para la carga de datos. Se accede desde la pantalla del primer proceso de TEMISAT; "Carga de Datos".
- CalculoTemperatura_proceso.html: Página de ayuda para el cálculo. Se accede desde la pantalla del segundo proceso de TEMISAT; "Cálculo de Temperatura Superficial".
- visualizar_herramientas.html: Página de ayuda para la visualización. Se accede desde la pantalla del tercer proceso de TEMISAT; "Visualización de Imágenes".
- guardarimagenes_porpasos.html: Página de ayuda para guardar los archivos de salida. Se accede desde la última pantalla de TEMISAT; "Guardar Imágenes".

Además, aparte de estas cinco pantallas de ayuda, se han incorporado dos adicionales:

- introduccion.html: Página que muestra los fundamentos básicos de los algoritmos incorporados en TEMISAT.
- cargarDatos_imagenes.html: Página que ayuda a comprender los datos de partida necesarios para usar TEMISAT.

A continuación, en la Figura 76, se muestra un ejemplo de la visualización de la página de inicio de la ayuda TEMISAT:



Figura 76. Presentación de la ayuda del programa TEMISAT. (Fuente: Elaboración propia)

7. Conclusiones y perspectivas futuras

Para finalizar el presente trabajo, se expondrá la recopilación de las diferentes conclusiones derivadas de este, así como las distintas perspectivas futuras de trabajo que podría tener, tanto mejoras en la herramienta TEMISAT como diferentes propuestas de trabajo infundadas por este.

7.1. Conclusiones

Partiendo de los objetivos determinados en el apartado 2, las conclusiones finales acerca del proyecto son las siguientes:

- *"Tratamiento de imágenes satelitales procedentes de diferentes plataformas desde su descarga hasta su manipulación pasando por la aplicación de diferentes correcciones"*: el uso de imágenes de satélite requiere de un pre-procesamiento (geométrico, radiométrico y atmosférico) adecuado a fin de deparar resultados robustos en el producto final.
- *"Evaluación del efecto de la atmósfera en la adquisición de datos, en forma de imágenes, desde el espacio, y determinación de las metodologías de compensación del mismo"*: la atmosfera juega un papel de gran relevancia en los datos capturados por las plataformas satelitales. Eco de ello resulta necesario efectuar diferentes correcciones para minimizar en la medida de lo posible el efecto de la atmósfera. Como se ha podido observar, la introducción de las correcciones atmosféricas para el cálculo de la temperatura terrestre permitiendo que la temperatura superficial terrestre calculada se aproxime a la realidad. Tanto es el efecto de la atmósfera, que su estado de concentración de humedad determina el método de cálculo de temperatura superficial más adecuado.
- *"Estudio y análisis de las diferentes metodologías de cálculo de temperatura superficial a partir de imágenes de satélite existentes dentro de la comunidad científica"*: el cálculo de la temperatura superficial, a través de imágenes satelitales puede ser efectuado a través de diferentes métodos (método monocal y método Split Window). Gracias al estudio, análisis y evaluación de las diferentes metodologías se ha llegado a la conclusión de que los métodos Monocal 1 y 2 son mejores respecto a los métodos Split-Window siendo el primero de ellos más adecuado para situaciones de humedad elevada. Gracias a ello se ha podido desarrollar una metodología

mejorada que combina ambos métodos en función de la humedad y de la temperatura de brillo del satélite obteniendo buenos resultados.

- *“Evaluación de los resultados obtenidos en diferentes zonas geográficas y diferentes periodos temporales frente a imágenes Analysis Ready Data (ARD)”*: la existencia de productos ya procesados como lo son las imágenes Analysis Ready Data han permitido llevar a cabo una evaluación profunda de los diferentes métodos de cálculo de temperatura superficial terrestre ante diferentes condiciones climáticas y zonas geográficas considerándose como verdad-terreno.
- *“Perfeccionar los conocimientos tanto del lenguaje de programación como en programación orientada a objetos, y así desarrollar un nuevo software informático”*: el desarrollo del presente trabajo fin de grado ha permitido aumentar de forma considerable los conocimientos de Programación Orientada a Objetos. Dichos conocimientos se han podido reflejar en la herramienta informática desarrollada como principal objetivo: TEMISAT. Matlab ha dado buenos resultados para el tratamiento y procesado de imágenes mediante ecuaciones matemáticas, mientras que tiene sus limitaciones con respecto de la interfaz gráfica. Para ello, HTML ha proporcionado los resultados esperados, con un nivel de grafismo profesional con respecto de las soluciones de Matlab.

7.2. Perspectivas futuras

Dada la extensión y la temática del trabajo fin de grado existe un amplio abanico de líneas futuras a seguir, entre ellas destacan:

- Universalizar el software TEMISAT al cálculo de temperatura superficial para las imágenes térmicas de los sensores más empleados, eliminando la limitación de su aplicación con imágenes de Landsat 8.
- El empleo de diferentes metodologías para la obtención de la emisividad, siendo este uno de los factores más influyentes a la hora de calcular la temperatura superficial terrestre, como por ejemplo el uso de métodos de recuperación paso a paso, método de recuperación simultánea o el método mejorado de SIMRM.
- Desarrollo de una metodología que permita mejorar la resolución espacial y temporal de las imágenes de satélite ya obtenidas para adquirir una serie de datos temporales intermedios.

- Realizar un estudio profundo de las diferentes correcciones atmosféricas de modo que se pueda estudiar su influencia para el cálculo final de la temperatura terrestre, incluso estudiar la posibilidad de introducir otras imágenes de humedad con mejor resolución.
- Introducir la posibilidad dentro del software TEMISAT de la descarga, registro y recorte de manera automática de las diferentes imágenes necesarias para el cálculo de la temperatura superficial terrestre
- Por último es importante indicar que sería interesante el estudio de nuevas metodologías para el cálculo de temperatura superficial, las cuales se centren en el estudio de áreas urbanas ya que estas son las zonas donde mayor error de estimación de temperatura se produce [32]. Las metodologías más actuales implementan otros factores meteorológicos adicionales, como puede ser la temperatura del aire [33].

Referencias

1. Carvajal, A. F., & Pabón, J. D. (2014). Temperatura de la superficie terrestre en diferentes tipos de cobertura de la región andina colombiana. *Sociedade & Natureza*, 26(1).
2. Iglesias, E. O. C. (2016). Aplicación de percepción remota para el estudio de áreas con un potencial Geotérmico. La Soledad (Jalisco) y los Negritos (Michoacán).
3. Kustas, W., & Anderson, M. (2009). Advances in thermal infrared remote sensing for land surface modeling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(12), 2071-2081.
4. Wang, K., & Liang, S. (2009). Evaluation of ASTER and MODIS land surface temperature and emissivity products using long-term surface longwave radiation observations at SURFRAD sites. *Remote Sensing of Environment*, 113(7), 1556-1565.
5. Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Skoković, D., Mattar, C., & Cristóbal, J. (2014). Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(10), 1840-1843.
6. Congedo, Luca. (2016). Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. Release 6.0.1.1. 10.13140/RG.2.2.29474.02242/1.
7. Sobrino, J. A. (2001). Teledetección. Universitat de Valencia.
8. Congedo, L. (2016). Semi-automatic classification plugin documentation. Release, 4(0.1), 29.
9. Gutiérrez, C. P., & Nieto, Á. L. (2006). Teledetección: nociones y aplicaciones. Carlos Pérez.
10. Fallah-Adl, H., Jájá, J., Liang, S., Townshend, J., & Kaufman, Y. J. (1996). Fast algorithms for removing atmospheric effects from satellite images. *IEEE Computational Science and Engineering*, 3(2), 66-77.
11. Sarrió, M. M., Gordillo, J., González-Guerrero, Ó., & Pons, X. (2017). Análisis comparativo de métodos para la estimación de la emisividad en la banda térmica del sensor tm de landsat-5. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (19), 55-80.

12. Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of environment*, 90(4), 434-440.
13. Caselles, V., López Garcia, M. J., Meliá, J., & Perez Cueva, A. J. (1989). El efecto de la isla térmica de la ciudad de Valencia obtenido a partir de transectos e imágenes NOAA-AVHRR. *Libro de comunicaciones de la III Reunión Científica del Grupo de Trabajo en Teledetección*, 259-69.
14. Li, Z. L., Tang, B. H., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., ... & Sobrino, J. A. (2013). Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote sensing of environment*, 131, 14-37.
15. ARIZA, A. (2013). Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM. Knowledge Portal, UNSPIDER. Último acceso, 1.
16. Jiménez-Muñoz, J. C., & Sobrino, J. A. (2003). A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D22).
17. Cristóbal, J., Jiménez-Muñoz, J., Prakash, A., Mattar, C., Skoković, D., & Sobrino, J. (2018). An improved single-channel method to retrieve land surface temperature from the Landsat-8 Thermal Band. *Remote Sensing*, 10(3), 431.
18. Yu, X., Guo, X., & Wu, Z. (2014). Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS—Comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method. *Remote Sensing*, 6(10), 9829-9852.
19. Du, C., Ren, H., Qin, Q., Meng, J., & Li, J. (2014, July). Split-window algorithm for estimating land surface temperature from Landsat 8 TIRS data. In *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 3578-3581). IEEE.
20. Avdan, U., & Jovanovska, G. (2016). Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data. *Journal of Sensors*, 2016.
21. Gao, B., et al., 2017. MODIS Atmosphere L2 Water Vapor Product. NASA MODIS Adaptive Processing System, Goddard Space Flight Center, USA: http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MOD05_L2.061

22. Juan Carlos Jimenez Muñoz. (2017). Tutorial "Principios y aplicaciones de teledetección térmica". Departamento de física de la Tierra y termodinámica. Universidad de Valencia, España: <http://www.youtube.com/watch?v=vh0ajQN180E>
23. Fernández, M. C. (2009). Manual básico de Matlab. Edit. Complutense, Madrid.
24. Acceleration of ice loss across the Himalayas over the past 40 years. BY J. M. MAURER, J. M. SCHAEFER, S. RUPPER, A. CORLEY. *SCIENCE ADVANCES* 19 JUN 2019: EAAV7266
<https://advances.sciencemag.org/content/5/6/eaav7266>
25. Redacción National Geographic (14/11/2017). "España se enfrenta a una de las sequías más destructivas de la historia". Artículo Medio Ambiente de National Geographic.
<https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2017/11/espana-se-enfrenta-una-de-las-sequias-mas-destructivas-de-la-historia>
26. Alexander, A. (2013). Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission). Centro de Investigación Y Desarrollo En Información Geográfica Del IGAC-CIAF, 46.
27. Carlson, T. N., & Ripley, D. A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote sensing of Environment*, 62(3), 241-252.
28. Rouse, J. W. (1974). Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation, NASA/GSFG, Type III. Final Report, 371.
29. Gonzales, P., & Jesús, J. (2014). Validación de la emisividad y temperatura de la superficie del suelo usando datos del Satélite LANDSAT 8 (Master's thesis).
30. Department of the Interior U.S. Geological Survey (02/10/2018). "U.S. Landsat Analysis Ready Data (ARD) Data Format Control Book (DFCB)" . LSDS-1873 Version 5.0
https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/atoms/files/LSDS-1873_US_Landsat_ARD_DFCB_0.pdf
31. w3schools. Web de descarga de plantillas HTML (2019). Recuperado de:
https://www.w3schools.com/css/css_rwd_templates.asp
32. Ruchi Bala, Rajendra Prasad, Vijay Pratap Yadav. *Advances in Space Research* (2019). "Disaggregation of modis land surface temperature in urban areas using improved thermal sharpening techniques". DOI:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117719303151?via%3Dihub>

33. Cristóbal, J., Jiménez-Muñoz, J., Prakash, A., Mattar, C., Skoković, D., & Sobrino, J. (2018). An improved single-channel method to retrieve land surface temperature from the Landsat-8 Thermal Band. *Remote Sensing*, 10(3), 431.
34. Van de Griend, A. A., & Owe, M. (1993). On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *International Journal of remote sensing*, 14(6), 1119-1131.
35. Valor, E., & Caselles, V. (1996). Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas. *Remote sensing of Environment*, 57(3), 167-184.
36. Sobrino, J. A., & Raissouni, N. (2000). Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: Application to Morocco. *International journal of remote sensing*, 21(2), 353-366.

ANEXO I. Propiedad intelectual TEMISAT



**Junta de
Castilla y León**

Delegación Territorial de Salamanca
Servicio Territorial de Cultura

REGISTRO PROVINCIAL DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL. SALAMANCA

D. UNIVERSIDAD DE SALAMANCA
vecino de SALAMANCA según D.N.I. Q3718001 E
con caducidad de _____ de _____, presenta a las 11:30
del día de hoy y para los efectos del Real Decreto Legislativo 1/1996 de 12 de abril _____
ejemplar de la obra cuyo título y demás circunstancias se expresan a continuación.
Título TEMISAT - (TEMPERATURE FROM SATELLITE IMAGE)

Clase PROGRAMA DE ORDENADOR
Autor PAULA DE ANDRÉS ANAYA, MARIA SANCHEZ APARICIO,
SUSANA LAGÜELA LÓPEZ

Propietario UNIVERSIDAD DE SALAMANCA
Editor _____
Tomos 2 DVD tamaño _____ páginas u hojas _____
Edición _____
N.º de Depósito Legal (en su caso) _____
Fecha de la divulgación de la obra (en su caso) _____
Observaciones _____


Y que por su presentación, HA PRODUCIDO EL

NÚM. DE SOLICITUD DE INSCRIPCIÓN SA-113-19

Salamanca, a SEIS de JUNIO de DOS MIL
Diecinueve



ANEXO II. Manual del usuario



TEMISAT

> **Presentación**

Fundamentos teóricos


Datos de partida

Carga de datos

Cálculo de temperatura

Visualizar imágenes

Guardar imágenes

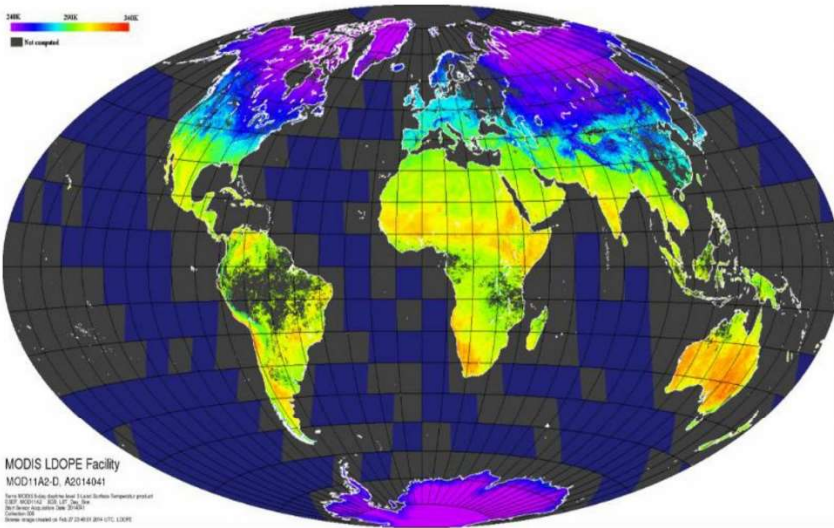


TEMISAT: AYUDA DEL PROGRAMA

TEMISAT es una herramienta para el cálculo de la temperatura superficial terrestre, a partir de imágenes satelitales, mediante diferentes metodologías.

Con esta ayuda de usuario podrá seguir paso a paso el curso del programa; desde los pasos previos de descarga de imágenes, pasando por el cálculo y la visualización de resultados, hasta el guardado de archivos generados.

Entre las imágenes que se generarán como resultado se encuentran; imagen de temperatura superficial terrestre en Kelvin (K) y grados Celsius (°C), emisividad de la banda térmica, Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)...



MODIS LDOPE Facility
 MOD11A2-D, A2014041
 This MODIS LDOPE Facility product is a 1 km resolution temperature product
 (S16, MOD11A2, S16, 1 km, 1 km)
 Data source: MODIS LDOPE Facility
 Collection: S16
 Image acquired on Feb. 27 20:45:19 2014 UTC, L1600



Presentación

> Fundamentos teóricos

Datos de partida

Carga de datos

Cálculo de temperatura

Visualizar imágenes

Guardar imágenes



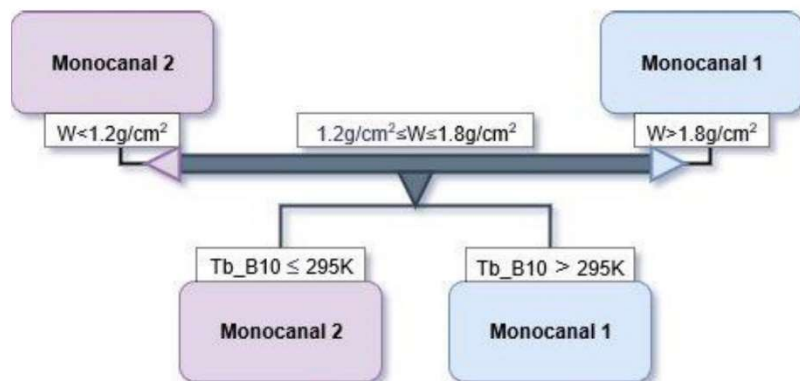
FUNDAMENTOS

MÉTODOS

Los métodos de cálculo con los que cuenta TEMISAT son los siguientes:

-Método recomendado: método de desarrollo propio que combina los métodos Monocanal 1 y Monocanal 2 (explicados posteriormente) en función del valor de vapor de agua (W) de cada pixel y de su temperatura de brillo (T_b) en el satélite. Este método necesita las imágenes del satélite Landsat 8; la banda roja (banda 4) la banda del infrarrojo cercano (banda 5) y la banda térmica (banda 10), los metadatos de Landsat 8 y la imagen de vapor de agua precipitable ya procesada de MODIS, a poder ser del satélite Terra (MOD_05).

El proceso de trabajo será el del Monocanal, posteriormente expuesto, y variará en la fórmula de Monocanal 1 o 2 dependiendo del valor del vapor de agua de cada pixel: para valores de $w < 1.2$ se usará Monocanal 2 y para $w > 1.8$ se usará Monocanal 1. Para valores intermedios se estudiará la temperatura de brillo del satélite: Monocanal 2 para $T_b \leq 295K$ y Monocanal 1 para $T_b > 295K$.



-Monocanal 1: este método necesita las imágenes del satélite Landsat 8; la banda roja (banda 4) la banda del infrarrojo cercano (banda 5) y la banda térmica (banda 10), los metadatos de Landsat 8 y la imagen de vapor de agua precipitable ya procesada de MODIS, a poder ser del satélite Terra (MOD_05).

El esquema de trabajo que sigue es el siguiente:



Presentación

› Fundamentos teóricos

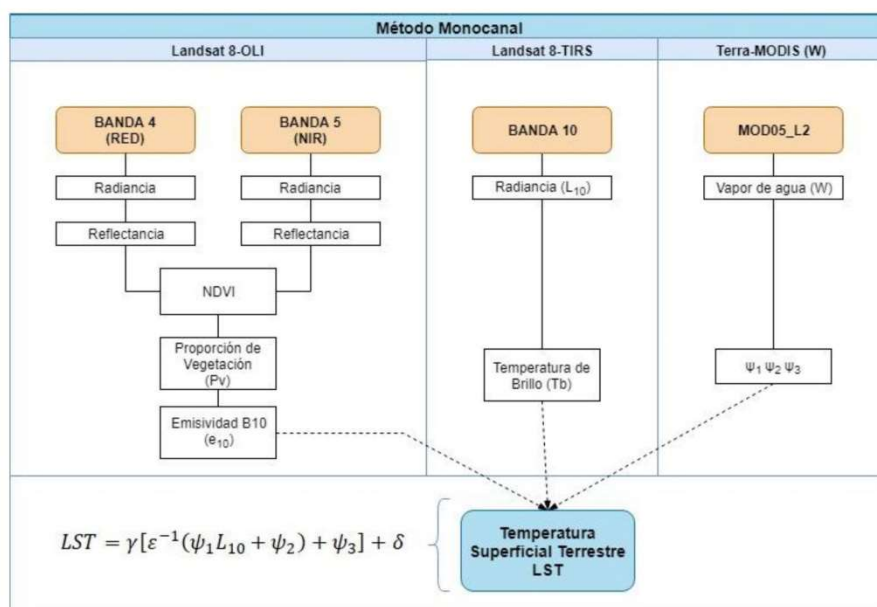
Datos de partida

Carga de datos

Cálculo de temperatura

Visualizar imágenes

Guardar imágenes



El flujo de trabajo y la fórmula final son las mismas para Monocanal 1 y Monocanal 2, lo que varía son los valores de Psi:

$$\psi_1 = 0.04019W^2 + 0.02916W + 1.01523$$

$$\psi_2 = -0.38333W^2 - 1.50294W + 0.20324$$

$$\psi_3 = 0.00918W^2 + 1.36072W - 0.27514$$

Este método se basa en el siguiente artículo:

Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Skoković, D., Mattar, C., & Cristóbal, J. (2014). Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 11(10), 1840-1843.

-Monocanal 2: este método necesita las imágenes del satélite Landsat 8; la banda roja (banda 4) la banda del infrarrojo cercano (banda 5) y la banda térmica (banda 10), los metadatos de Landsat 8 y la imagen de vapor de agua precipitable ya procesada de MODIS, a poder ser del satélite Terra (MOD_05).

El esquema de trabajo que sigue es el mismo que en Monocanal 1:



Presentación

> Fundamentos teóricos

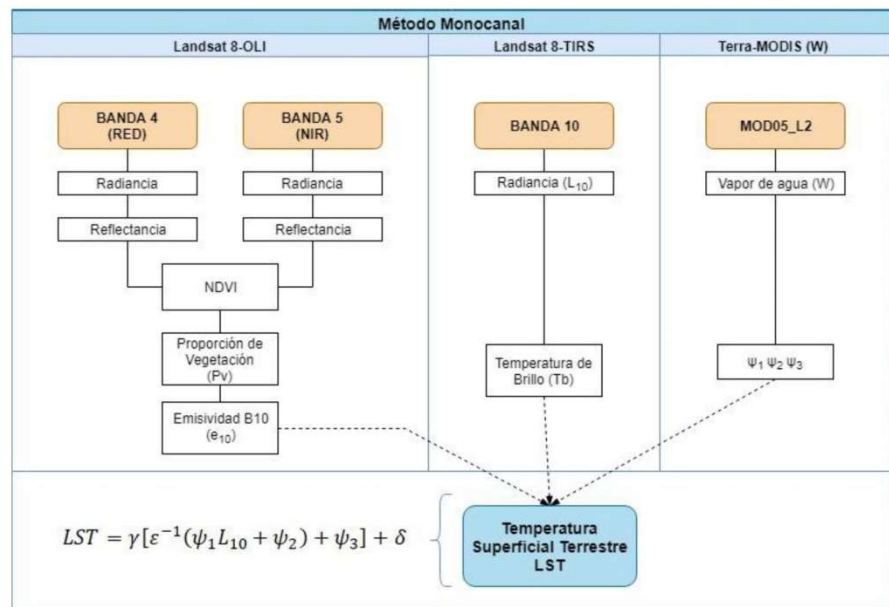
Datos de partida

Carga de datos

Cálculo de temperatura

Visualizar imágenes

Guardar imágenes



El flujo de trabajo y la fórmula final son las mismas para Monocanal 1 y Monocanal 2, lo que varía son los valores de Psi:

$$\psi_1 = 0.0099976W^3 + 0.00966064W^2 + 0.09347952W + 1.02178928$$

$$\psi_2 = -0.05327456W^3 - 0.4880672W^2 - 1.4640128W + 0.06216416$$

$$\psi_3 = -0.05216976W^3 + 0.39854112W^2 + 0.83252272W - 0.02393664$$

Este método se basa en el siguiente artículo:

Jiménez-Muñoz, J. C., & Sobrino, J. A. (2003). A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D22).

-Split-Window 1: este método necesita las imágenes del satélite Landsat 8; la banda roja (banda 4) la banda del infrarrojo cercano (banda 5) y las bandas térmicas (banda 10 y banda 11), los metadatos de Landsat 8 y la imagen de vapor de agua precipitable ya procesada de MODIS, a poder ser del satélite Terra (MOD_05).

El esquema de trabajo que sigue es el siguiente:



Presentación

» Fundamentos teóricos

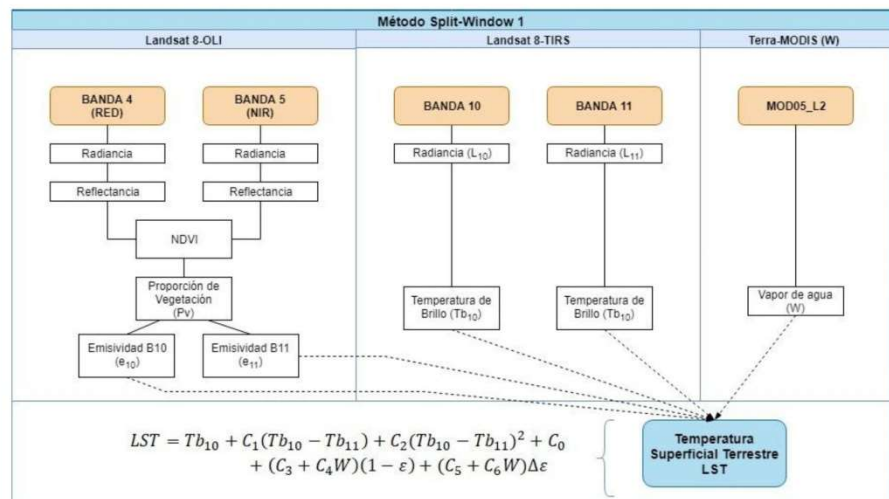
Datos de partida

Carga de datos

Cálculo de temperatura

Visualizar imágenes

Guardar imágenes

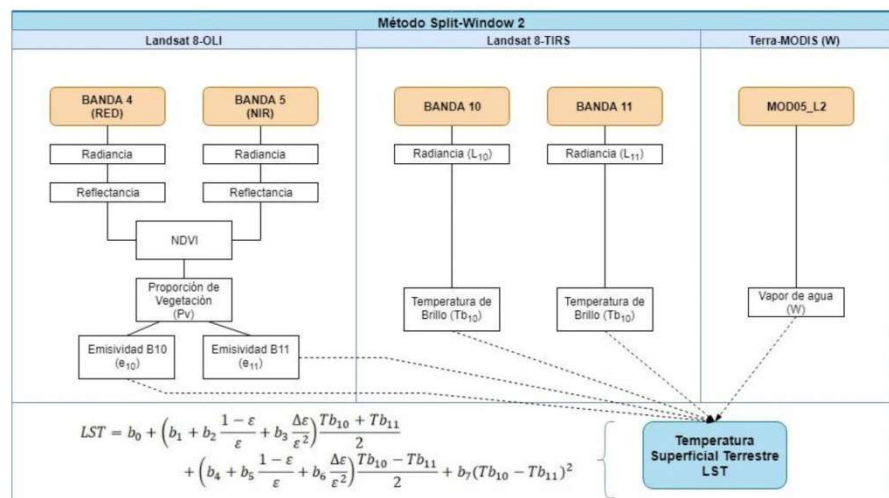


Este método se basa en el siguiente artículo:

Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Skoković, D., Mattar, C., & Cristóbal, J. (2014). Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 11(10), 1840-1843.

-Split-Window 2: este método necesita las imágenes del satélite Landsat 8; la banda roja (banda 4) la banda del infrarrojo cercano (banda 5) y las bandas térmicas (banda 10 y banda 11), los metadatos de Landsat 8 y la imagen de vapor de agua precipitable ya procesada de MODIS, a poder ser del satélite Terra (MOD_05).

El esquema de trabajo que sigue es el siguiente:





Presentación

» Fundamentos teóricos

Datos de partida

Carga de datos

Cálculo de temperatura

Visualizar imágenes

Guardar imágenes

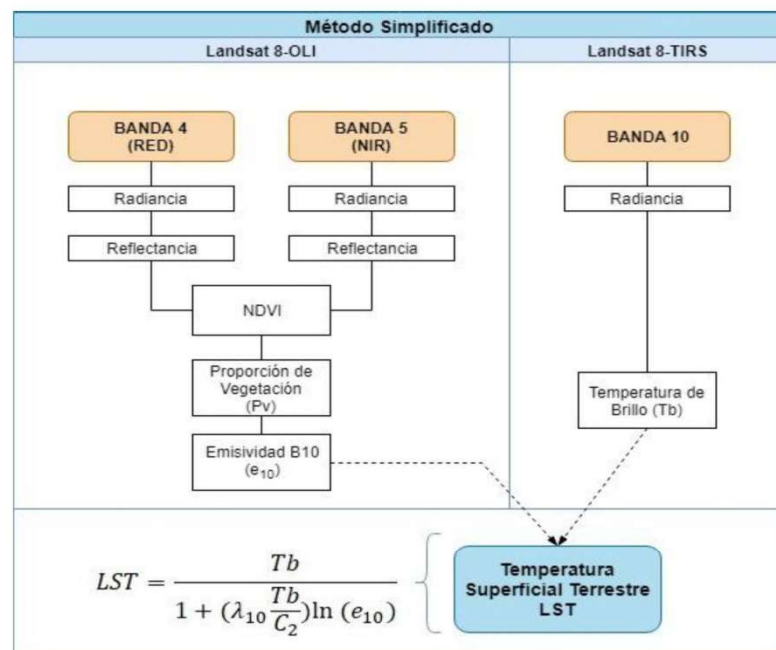


Este método se basa en el siguiente artículo:

Du, C., Ren, H., Qin, Q., Meng, J., & Li, J. (2014, July). Split-window algorithm for estimating land surface temperature from Landsat 8 TIRS data. In 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (pp. 3578-3581). IEEE.

-Simplificado: este método necesita las imágenes del satélite Landsat 8; la banda roja (banda 4) la banda del infrarrojo cercano (banda 5) y la banda térmica (banda 10), y los metadatos de Landsat 8. Este se puede considerar más rápido y a la vez más inexacto.

El esquema de trabajo que sigue es el siguiente:



Este método se basa en el siguiente artículo:

Avdan, U., & Jovanovska, G. (2016). Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data. Journal of Sensors, 2016.



Presentación

Fundamentos teóricos

► **Datos de partida**

Carga de datos

Cálculo de temperatura

Visualizar imágenes

Guardar imágenes



DATOS DE PARTIDA

Antes de comenzar a usar la herramienta TEMISAT, se deben de haber descargado y procesado una serie de imágenes:

-Imagen de la banda 4 del satélite Landsat 8. Se necesitará la imagen ORIGINAL y un recorte de la zona deseada. **DEBEMOS HACER EL MISMO RECORTE EN EL RESTO DE IMÁGENES.***

-Imagen de la banda 5 del satélite Landsat 8. Se necesitará la imagen ORIGINAL y un recorte de la zona deseada.

-Imagen de la banda 10 del satélite Landsat 8. Se necesitará únicamente un recorte de la zona deseada.

-Metadatos del satélite Landsat 8. Es importante **NO MODIFICAR** este archivo y descargarlo en formato .txt

Los metadatos e imágenes antes mencionadas serán siempre necesarias para el cálculo, dependiendo del método seleccionado estas otras serán opcionales:

-Imagen de la banda 11 del satélite Landsat 8. Se necesitará únicamente un recorte de la zona deseada. Esta imagen será necesaria para los métodos Split-Window.

-Imagen ya procesada del sensor MODIS, a poder ser del satélite Terra (el Terra sigue una órbita muy parecida, en horario, al Landsat8, de ahí su preferencia. En ocasiones, en alguna zona, el satélite Terra no tiene imágenes por lo que habría que suplir esta por la misma imagen pero del satélite Aqua***), que da el vapor de agua precipitable (MOD05_L2 para Terra y MYD05_L2 para Aqua). Se necesitará únicamente el recorte de la zona deseada. Esta imagen será necesaria para todos los métodos menos para el método Simplificado.**

DATOS Y ENLACES DE INTERÉS

*Las imágenes de Landsat 8 tienen una resolución radiométrica de treinta metros, es la resolución final de nuestra imagen de temperatura superficial terrestre. Para la descarga de las imágenes y los metadatos de este satélite puede ir a las páginas gratuitas:

-Remotepixel: <https://search.remotepixel.ca/#3/40/-70.5>

-Earthexplorer (página de la USGS): <https://earthexplorer.usgs.gov/>

**Las imágenes de MODIS tienen una resolución radiométrica de un kilómetro, se debe cambiar su resolución previamente para poder trabajar con ella, de no ser así saltará un error en el programa indicando que no tiene la misma medida que el resto



Presentación

Fundamentos teóricos

► **Datos de partida**

Carga de datos

Cálculo de temperatura

Visualizar imágenes

Guardar imágenes



de imágenes. Para la descarga de la imagen de este satélite puede ir a la página gratuita:

-LAADS DAAC (NASA): <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>

***Para comprobar la trayectoria y solape de las imágenes de los satélites Terra y Aqua puede visitar la siguiente página:

-Órbita satélite Aqua: <https://www.ssec.wisc.edu/datacenter/aqua/>

-Órbita satélite Terra: <https://www.ssec.wisc.edu/datacenter/terra/>

-Comparativa de los 2 satélites:

https://remotepixel.ca/projects/viirsmodis_compare.html

El recorte de las imágenes y su remuestreo se puede hacer en diferentes programas, como en el programa gratuito de SIG Qgis. Puede descargarse desde el siguiente enlace:

<https://qgis.org/es/site/forusers/download.html>

IMPORTANTE: se deberán elegir imágenes con un porcentaje de nubes menor del 2%.



Presentación

Fundamentos teóricos

Datos de partida

► **Carga de datos**

Cálculo de temperatura

Visualizar imágenes

Guardar imágenes

CARGA DE DATOS

MÉTODOS

Antes de comenzar con la carga de datos es necesaria la elección del método de cálculo.

Entre los métodos se encuentran:

-Método recomendado

-Simplificado

-Monocanal 1

-Monocanal 2

-Split-Window 1

-Split-Window 2

Para más detalles acerca de los métodos ir al apartado FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

Dependiendo del método seleccionado se activarán o desactivarán botones del apartado de selección de imágenes. Una vez seleccionado el método deseado pasamos al apartado de subida de imágenes.

IMÁGENES

Tras la selección del método es necesaria la carga de imágenes



Presentación
Fundamentos teóricos
Datos de partida
➤ **Carga de datos**
Cálculo de temperatura
Visualizar imágenes
Guardar imágenes



Previamente, antes de comenzar a usar la herramienta TEMISAT, se deben de haber descargado y procesado una serie de imágenes. Esto viene explicado en el apartado de DATOS DE PARTIDA.

Las imágenes necesarias, según el método seleccionado, son las siguientes:

| | Banda 4 (RED) | Banda 5 (NIR) | Banda 10 (TIRS1) | Banda 11 (TIRS2) | Vapor de agua precipitable (MOD05_L2) |
|----------------------------|---------------|---------------|------------------|------------------|---------------------------------------|
| Método recomendado | ✓ | ✓ | | | ✓ |
| Monocanal 1 | ✓ | ✓ | | | ✓ |
| Monocanal 2 | ✓ | ✓ | | | ✓ |
| Split-Window1 | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ |
| Split-Window2 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Método simplificado | ✓ | ✓ | ✓ | | |

Los metadatos SIEMPRE serán necesarios, al igual que las bandas 4, 5 (tantos las imágenes originales como los recortes) y la banda 10.

A medida que se vayan cargando las imágenes necesarias se irán poniendo los botones en color verde como indicativo de que se puede cargar la siguiente imagen. Hasta que no se carguen todas las imágenes necesarias para el método seleccionado no se podrá proceder al cálculo de la temperatura.

Si alguno de los pasos a seguir es erróneo (imagen con medidas diferentes, metadatos incompletos...) saldrá un error y el botón se pondrá en rojo .



Presentación

Fundamentos teóricos

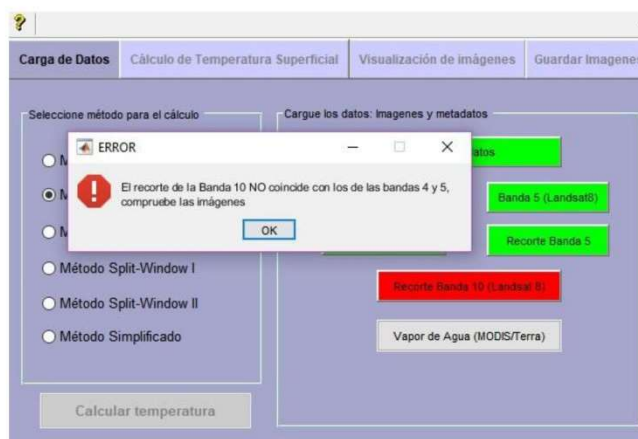
Datos de partida

➤ **Carga de datos**

Cálculo de temperatura

Visualizar imágenes

Guardar imágenes



Para poder continuar se debe cargar de nuevo la imagen. Si el error persiste puede que la imagen errónea sea alguna que ha cargado anteriormente, en este caso cierre el programa y comience de nuevo.

CALCULAR

Una vez se tenga el método seleccionado y las imágenes cargadas correctamente (todos los botones en verde) se procederá al cálculo de la temperatura. El botón "Calcular temperatura" se habilitará y al hacer clic le llevará de forma automática al apartado del cálculo.





Presentación

Fundamentos teóricos

Datos de partida

Carga de datos

➤ **Cálculo de temperatura**

Visualizar imágenes

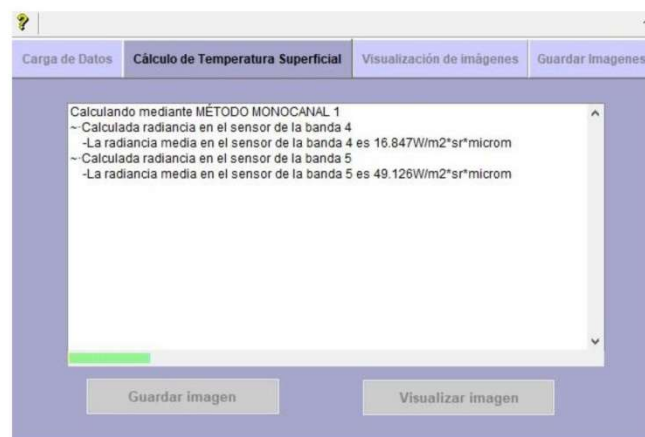
Guardar imágenes



CÁLCULO DE TEMPERATURA

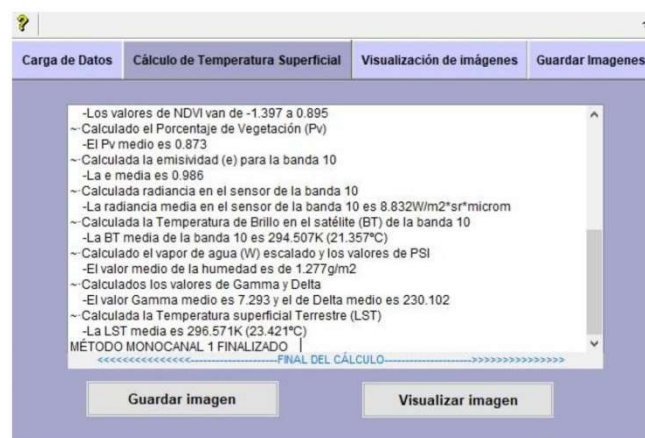
PROCESO

Una vez seleccionado el método y cargadas las imágenes en la primera pestaña, para proceder al cálculo de la temperatura, es necesario hacer clic sobre el botón "Calcular temperatura". De manera automática se pasará a la segunda pestaña del programa. En este apartado no tendrá que cargar nada, solo esperar a que se ejecute automáticamente el cálculo.



En la pantalla aparecerá el nombre del proceso seleccionado, los pasos que realiza a tiempo real con algunos datos de interés y la barra de progreso para comprobar cuánto queda para terminar.

Cuando finalice podrá decidir por qué apartado continuar, si por la visualización de resultados o por su guardado. A esta pantalla siempre podrá regresar para visualizar todo el cálculo que se ha hecho, al igual que cuando finalice podrá ir a guardar o visualizar las veces que desee y en el orden que quiera.



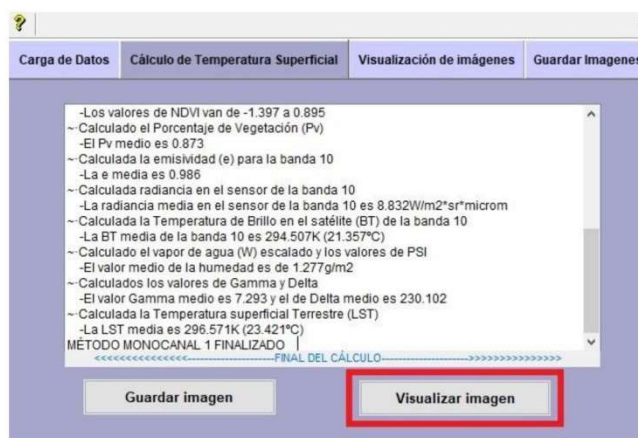


Presentación
 Fundamentos teóricos
 Datos de partida
 Carga de datos
 > **Cálculo de temperatura**
 Visualizar imágenes
 Guardar imágenes



VISUALIZAR IMAGEN

Al hacer clic sobre el botón "Visualizar imagen" lleva al usuario de forma automática al apartado de visualización de imágenes. También podrá acceder desde la pestaña "Visualización de imágenes" de la barra superior.



GUARDAR IMAGEN

Al hacer clic sobre el botón "Guardar imagen" lleva al usuario de forma automática al apartado de guardar resultados. También podrá acceder desde la pestaña "Guardar imágenes" de la barra superior.





Presentación

Fundamentos teóricos

Datos de partida

Carga de datos

Cálculo de temperatura

> Visualizar imágenes

Guardar imágenes

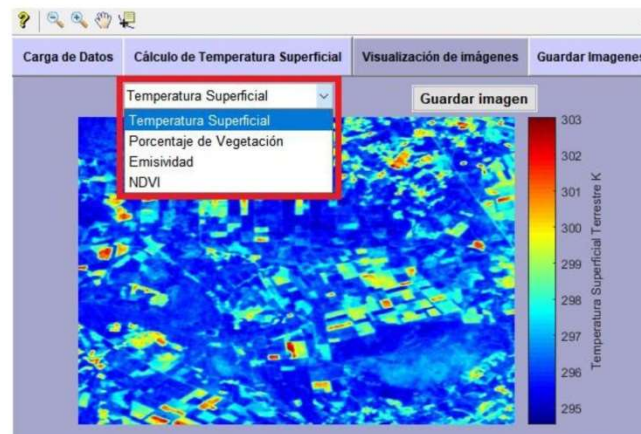


VISUALIZAR IMÁGENES

SELECCIÓN DE IMAGEN

Al Por defecto se visualizará la imagen de temperatura superficial terrestre en Kelvin (K).

En la pestaña desplegable en la parte superior izquierda se podrá seleccionar la imagen que se desee visualizar.



Las imágenes disponibles son:

-Imagen de temperatura superficial terrestre en K.

-Imagen de proporción de vegetación (Pv).

-Imagen de emisividad. En el caso de haber hecho el cálculo con los métodos Split-Window se visualizará la emisividad media (de las bandas 10 y 11) para el resto de casos se visualizará la emisividad de la banda 10. Esta información vendrá indicada en la leyenda de la escala gráfica.

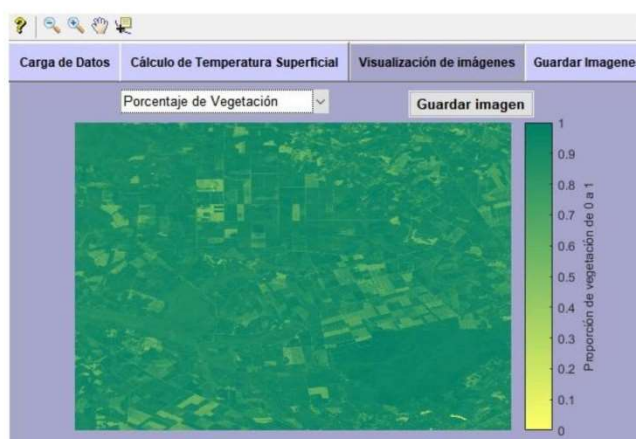
-Imagen del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

El color de la escala gráfica variará dependiendo de la imagen seleccionada.

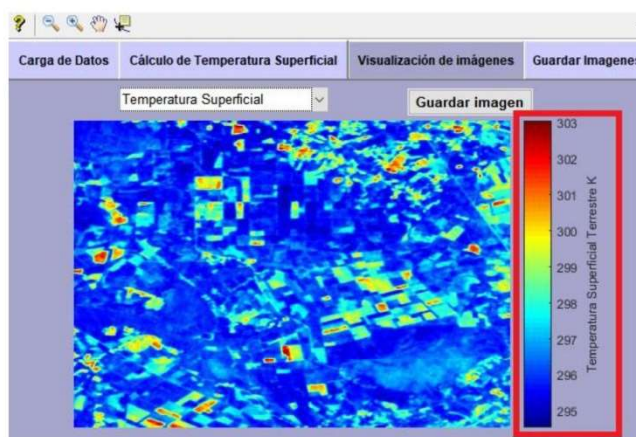
Para proporción de vegetación y NDVI la escala gráfica viene con una tonalidad de amarillo a verde, para relacionar de forma intuitiva que el verde es la zona con más vegetación y la amarilla la más seca.



- Presentación
- Fundamentos teóricos
- Datos de partida
- Carga de datos
- Cálculo de temperatura
- > Visualizar imágenes
- Guardar imágenes



Para el resto de imágenes la escala gráfica tiene los siguientes colores. Este mapa de colores también es muy intuitivo para la temperatura ya que los rojos son los más cálidos y los azules los más fríos.



HERRAMIENTAS

Existen diferentes herramientas para la manipulación y consulta de las imágenes. Estas se encuentran en la parte superior izquierda.



Presentación

Fundamentos teóricos

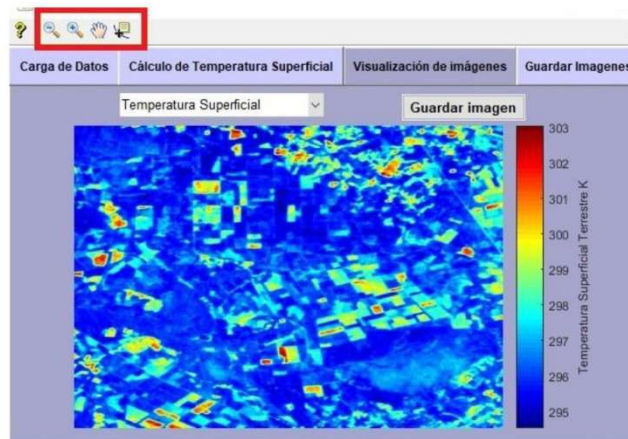
Datos de partida

Carga de datos

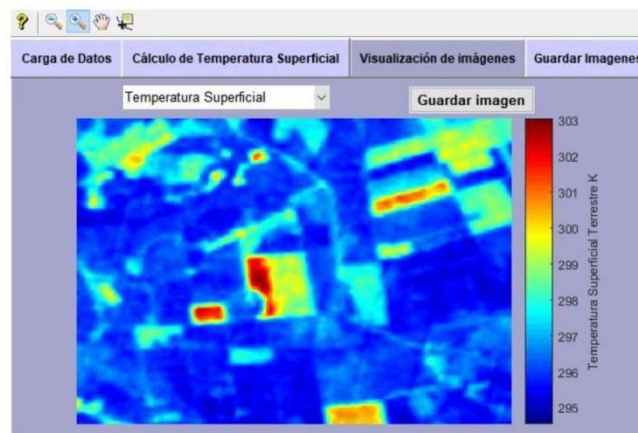
Cálculo de temperatura

> Visualizar imágenes

Guardar imágenes



ZOOM +: permite ampliar la imagen. Con un clic amplía al centro de la imagen y haciendo un recuadro amplía la zona indicada.

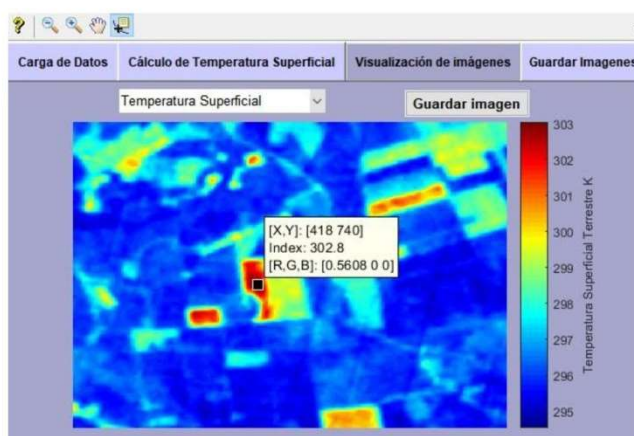


ZOOM -: permite alejar la imagen. Con un clic aleja desde el centro de la imagen.

Información del pixel: aporta información del pixel seleccionado, su valor y posición. En el caso de la imagen de temperatura superficial, su temperatura y su posición (número de fila y de columna).



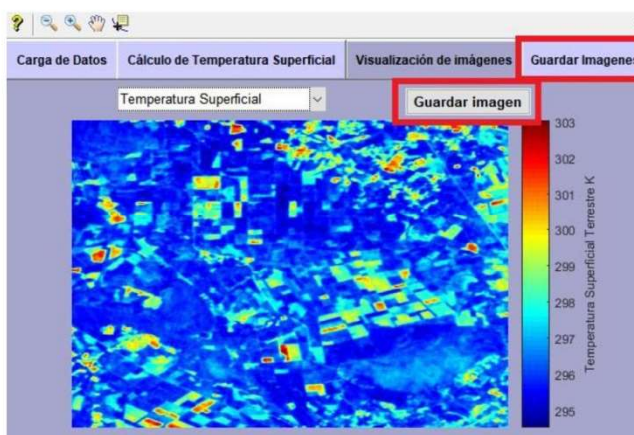
- Presentación
- Fundamentos teóricos
- Datos de partida
- Carga de datos
- Cálculo de temperatura
- > Visualizar imágenes
- Guardar imágenes



*IMPORTANTE: para evitar fallos, deseleccionar cuando se dejen de usar las herramientas.

GUARDAR IMÁGENES

Al hacer clic sobre el botón "Guardar imagen" lleva al usuario de forma automática al apartado de guardar resultados. También podrá acceder desde la pestaña "Guardar imágenes" de la barra superior.





Presentación

Fundamentos teóricos

Datos de partida

Carga de datos

Cálculo de temperatura

Visualizar imágenes

► Guardar imágenes

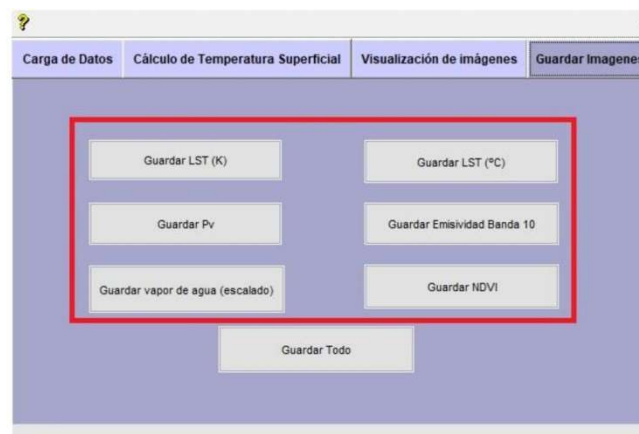


GUARDAR IMÁGENES

Para guardar las imágenes generadas, Temisat ofrece dos opciones; por pasos o guardar todo.

GUARDAR POR PASOS

El usuario puede guardar una o varias imágenes, haciendo clic en los botones que le interesen.



Dependiendo del tipo de método con el que se haya operado aparecerán unas opciones u otras para guardar:

- Guardar temperatura superficial terrestre en Kelvin (K).
- Guardar temperatura superficial terrestre en grados Celsius (°C).
- Guardar proporción de vegetación (Pv).
- Guardar emisividad (e). En el caso de los métodos Split-window se guardarán la emisividad de la banda 10, de la banda 11 y la media de estas (la media de ambas es la que se usa para el cálculo de temperatura superficial), para el resto de casos únicamente se guardará la emisividad de la banda 10.
- Guardar vapor de agua escalado (W). Dado que la imagen de vapor de agua que descarga el usuario viene sin escalar, el programa Temisat aplica el coeficiente de escala necesario para poder trabajar con la imagen. Esta opción estará inhabilitada para el método simplificado ya que no usa esta imagen.
- Guardar el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).



- Presentación
- Fundamentos teóricos
- Datos de partida
- Carga de datos
- Cálculo de temperatura
- Visualizar imágenes
- » Guardar imágenes



GUARDAR TODO

Para guardar todos los resultados obtenidos de una única vez, el usuario tan solo tendrá que pulsar en el botón "Guardar todo" , indicando un directorio y un nombre raíz para identificar las imágenes.

Los archivos a guardar son los mismos que en los botones superiores:

- Temperatura superficial terrestre en Kelvin (K).
- Temperatura superficial terrestre en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$).
- Proporción de vegetación (Pv).
- Emisividad (e). En el caso de los métodos Split-window se guardarán la emisividad de la banda 10, de la banda 11 y la media de estas (la media de ambas es la que se usa para el cálculo de temperatura superficial), para el resto de casos únicamente se guardará la emisividad de la banda 10.
- Vapor de agua escalado (W).
- Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).



Dependiendo del tipo de método con el que se haya operado se guardarán unas imágenes u otras con los siguientes nombres:

- Temperatura superficial terrestre en K: TS_K_*raíz.
- Temperatura superficial terrestre en $^{\circ}\text{C}$: TS_C_*raíz.
- Proporción de vegetación: PV_*raíz que hayamos puesto.



Presentación

Fundamentos teóricos

Datos de partida

Carga de datos

Cálculo de temperatura

Visualizar imágenes

► Guardar imágenes



-Guardar emisividad. En el caso de los métodos Split-window se guardarán la emisividad en la banda 10, en la banda 11 y la media de ambas, para el resto de casos únicamente se guardará la emisividad de la banda 10. Se guardará con los nombres: emisividad10_*.raíz, emisividad11_*.raíz y emisividadMedia_*.raíz.

-Vapor de agua escalado (W): humedad_escalada_*.raíz. Se diferencia de la imagen de MODIS en que a esta se le ha aplicado un coeficiente de escala. Esta opción estará inhabilitada para el método simplificado ya que no usa esta imagen.

-NDVI: NDVI_*.raíz.

Todas estas imágenes se guardarán en formato GeoTiff.

El usuario sabrá que se han guardado todas las imágenes cuando, en la parte inferior de la pantalla, aparezca el mensaje "TODOS LOS ARCHIVOS GUARDADOS" ;



ANEXO III. Código fuente

Para una mejor comprensión del funcionamiento del programa desarrollado se muestra en la siguiente figura el flujo general de funcionamiento de TEMISAT.

